

AALTO –YLIOPISTON TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Automaatio- ja systeemitekniikan laitos

Antti Aspiala

Operaatioiden suunnittelu ja päätöksentekomallit automaattisessa peltoviljelyssä

Diplomityö

Espoo 22. helmikuuta 2010

Valvoja: Professori Arto Visala

Ohjaaja: Timo Oksanen

AALTO-YLIOPISTO TEKNILLINEN KORKEAKOULU Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta AS-koulutusohjelma		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Antti Aspiala		
Työn nimi: Operaatioiden suunnittelu ja päätöksentekomallit automaattisessa peltoviljelyssä		
Sivumäärä: 61	Päiväys: 5.3 2010	Julkaisukieli: Suomi
Professuuri: Automaatiotekniikka		Professuurikoodi: Aut-84
Työn valvoja: Professori Arto Visala		
Työn ohjaaja: Timo Oksanen		
<p>Automaatio on yleistynyt teollisuudessa samalla, kun henkilöstökustannukset ovat nousseet. Peltoviljelyssä varsinainen automaatio on vielä harvinaista, vaikka traktorien automatisointia on tutkittu paljon. Pellon ominaisuuksista on jo mahdollista saada niin tarkkoja mittauksia, että pellon tehokas paikkakohtainen hoito on mahdollista. Tässä diplomityössä tutkitaan erilaisten päätöksentekomallien soveltuvuutta automaattisen peltoviljelyn ohjausjärjestelmään. Tutkimuksessa on toteutettu simulaattori, jolla voidaan simuloida erilaisten maatilojen peltöjen kehitystä erilaisissa olosuhteissa. Simulaattori käyttää Agroteknologian laitoksen toteuttamaa kasvimallia, jonka avulla pystytään simuloimaan muutamien neliömetrien kokoisen peltoalaelementin kehitystä. Näiden peltoalaelementtien avulla pystytään simuloimaan peltoja siten, että niiden paikkakohtaiset vaihtelut pystytään havaitsemaan.</p> <p>Tässä työssä on keskitytty yhden kasvukauden aikana tehtäviin tyypillisiin toimenpiteisiin viljanviljelyssä. Tavoitteena on ollut tutkia muutaman päätöksentekomallin toimintaa tiettyjen operaatioiden suunnittelussa sekä kehittää menetelmä, jolla voidaan selvittää minkälaiselle peltoalueelle mikäkin hoito-operaatio kannattaa tehdä. Näiden päätöksentekomallien ohella on selvitetty mahdollisuutta yhdistää simulaattoriin komponentit, joiden avulla voidaan tutkia peltoviljelyn logistisia ongelmia. Sumeaa logiikkaa testattiin rikkakasvien ja viljautien torjunnan suunnittelussa. Lannoittamisen ja sadonkorjuun suunnitteluun testattiin odotusarvoihin pohjautuvaa menetelmää. Odotusarvot tähän saatiin kasvimallista. Simulaattori on toteutettu Visual Studio-ohjelmistokehitysohjelmalla, C#-ohjelmointikielellä. Skenaarioiden luominen ja niiden paikkatietojen määrittäminen tapahtuu ArcGIS-ohjelmistolla ja kasvimalli on toteutettu Matlab-matematiikkaohjelman Simulink-mallinnustyökalulla.</p> <p>Kehitetyt päätöksentekomallit ja käsittelyn vaativien peltoalueiden määrittäminen toimivat pääsääntöisesti hyvin. Myös logististen komponenttien yhdistäminen on toteutettu työssä. Lisälannoituksen päätöksentekomalli ei toimisi oikeassa viljelyssä, sillä sen tarvitsemat kasvimallista saadut estimaatit eivät ole tarpeeksi realistisia. Se kuitenkin toimii hyvin viljeltäessä simuloitua peltoa. Optimimaalinen kertalannoite-erä lisälannoituksessa osoittautui huomattavasti tavanomista pienemmäksi. Sumea logiikka oli vaivatonta kehittää verrattuna odotusarvomenetelmään. Se tarjoaa myös hyvät jatkokehitysmahdollisuudet.</p>		
Asiasanat: Päätöksenteko, peltoviljely, automaatio, simulointi		

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY Faculty of Electronics, Communications and Automation Degree Programme of Automation and Systems Technology		ABSTRACT OF MASTER'S THESIS
Author: Antti Aspiala		
Title: Operation planning and decision-making methods in automatic crop farming		
Pages: 61	Date: 5.3 2010	Publication language: Finnish
Professorship: Automation technology	Code: Aut-84	
Supervisor: Professor Arto Visala		
Instructor: Timo Oksanen		
<p>Automation has become more and more common in industry while staff costs have exploded. This is not the case however in the agricultural sector where it is still quite rare - even though there has been lot of research into the automation of tractors. It is already possible to get extremely accurate measurements from fields where spatial farming is effective. In this Master's thesis, different decision-making models are examined for the applicability of an automatic cropping control system. A simulator has been generated to support the research. It can simulate development of different kinds of crop fields under differing circumstances. The simulator uses a plant simulation model which is developed by the Department of Agrotechnology at Helsinki university. The plant model may simulate the growth of a small area element of crop field. With these crop field elements, it is possible to simulate whole crop fields with spatial variations.</p> <p>In this Master's thesis the main focus is on the typical operations of crop farming of a single growing period. The objective is to study the performance of certain decision-making models in the planning of certain operations and develop an algorithm to solve the kind of area where the operation should be done. Also, there is an intention to integrate components to the simulator which will enable the possibility of investigating logistic problems in crop farming. Fuzzy logic is tested in the planning of plant protection. The method which is based on expectation values is tested in the planning of fertilizing and harvesting. The plant model generates the expected values for this. The simulator is developed with a Visual Studio software development tool using the C# programming language. The scenarios and geographical information are generated with ArcGIS software and the plant model is developed with the Simulink modelling software of Matlab math software.</p> <p>The decision-making models and algorithm for operated areas works well and the integration of logistic components is accomplished. The decision-making model of additional fertilizing works well in the simulator but would not work in the real world. This is because the expectation value estimates it needs are not realistic enough.</p>		
Keywords: Decision making, crop farming, automation, simulation		

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Abstract	3
Sisällysluettelo	4
Esipuhe	6
1 Johdanto	7
2 Kasviviljelysimulaattorit ja päätöksentekomallit	10
3 Pellolla tehtävät operaatiot ja niiden toteuttaminen	13
3.1 Kylvä	13
3.2 Lannoitus	13
3.3 Kasvinsuojelu	15
3.4 Sadonkorjuu	15
4 Simulaattorin toteutus	17
4.1 Skenaarion alustus	19
4.2 Sään generoiminen	20
5 Virtausmalli	23
6 Kehitetyt päätöksentekomallit	24
6.1 Sumea logiikka	24
6.2 Odotusarvomenetelmä	29
6.3 Reunaehto operaatioille	31
6.4 Paikkakohtainen päätösmalli	31
6.5 Logistinen päätösmalli	32
7 Tulokset	35
7.1 Simulointijärjestelyt	35

7.2 Simulaatiotulokset ja päätöksentekomallien toiminta	38
7.3.1 Kylvö	40
7.3.2 Lannoitus	41
7.3.3 Rikka- ja tautitorjunta	44
7.3.4 Sadonkorjuu	46
7.3.5 Logistiikka	47
8 Johtopäätökset	49
8.1 Sumeaan logiikkaan pohjautuvat menetelmät	49
8.2 Odotusarvoon pohjautuvat menetelmät	50
8.3 Logistisetkomponentit	53
9 Yhteenveto	54
Lähteet	57
Liite 1: Generoitua ja oikeaa sadedataa vertailtuna	62
Liite 2: Lämpötilan generointi	63
Liite 3: Päivän pituuden laskeminen	65

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Thomas Maximowin ja Jouko Kinnarin töiden pohjalta, jotka ovat selvittäneet ArcGIS -ohjelman soveltuvuutta peltosimulaattorin simulointialustana. Kiitos heille suuresta pohjatyöstä, josta selvisi, mitä ArcGIS:llä kannattaa tehdä ja ennen kaikkea, mitä sillä ei kannata tehdä. Haluan kiittää myös Suomen Akatemiaa tämän projektin rahoittamisesta, sekä entistä Teknillistä korkeakoulua nykyistä Aalto yliopiston Teknillistä korkeakoulua, mahdollisuudesta suorittaa mielenkiintoinen diplomityö.

Haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa Timo Oksasta asiantuntevasta ohjauksesta, sekä niistä lukuisista ohjeista ja vinkeistä, joita sain häneltä liittyen ohjelmointiin ja ohjelmien käyttöön. Kiitos myös diplomityöni valvojalle Arto Visalalle rakentavista kommentteista sekä suuresta kiinnostuksesta työtäni kohtaan.

Käytin työssäni Mikko Hakojärven toteuttamaa kasvisimulaattoria ja sain häneltä monia asiantuntevia pellon hoitoa koskevia tietoja. Kiitos hänelle suuresta avusta sekä hyvin sujuneesta yhteistyöstä. Kiitos myös muille Agroteknologian laitoslaisille, jotka edesauttoivat diplomityöni edistymistä.

Tämän lisäksi haluan vielä kiittää Aino Aspialaa, Susanna Nenosta, Kalle Kollinia ja Vilma Järvisalaa diplomityöni oikolukemisesta. Automaatio- ja systeemitekniikan kiltaa kiitän koko opiskelun aikaisesta tuesta ja turvasta, sekä niistä monista virkistävistä hetkistä, joiden jälkeen olen jaksanut taas opiskella hieman pidempään.

1 Johdanto

Automaatio on yleistynyt huimaa vauhtia teollisuudessa. Tehtaissa kaikki mahdollinen on automatisoitu tai on yritetty automatisoida. Maataloudessa automaatio ei ole niin yleistä, vaikka joitain sovelluksia onkin olemassa. Lypsykoneet ja navetan siivousrobotit ovat esimerkki maataloudessa käytetyistä sovelluksista. Työvoimakustannukset ovat kuitenkin nousseet pilviin länsimaaisessa maataloudessa, joten automaation lisääminen on välttämätöntä.

Traktoreihin on kehitetty monia automaattisia apuvälineitä, mutta varsinaista autonomisuutta on edelleen hyvin vähän. Yksi uusinta automaatiotekniikkaa hyödyntävä menetelmä on täsmäviljely. Siinä mitataan pellon ominaisuuksia monesta eri kohdasta. Saadun tiedon perusteella pystytään esimerkiksi antamaan jokaiselle kohdalle pellossa juuri sen verran lannoitetta kuin se tarvitsee. Olosuhteet vaihtelevat eri kohdissa peltoa esimerkiksi maalajin, ravinnepitoisuuksien, kosteuden ja varjostumisen takia. Tästä johtuen kasvupotentiaali vaihtelee pellon eri kohdissa. Viljely tulisikin suunnitella pienemmissä paloissa kuin kokonaiselle pellolle keskiarvoistaen. Automaatioasteen kohoaminen peltotyökoneissa on mahdollistanut tarkemman ja tehokkaamman viljelyn.

Tässä diplomityössä tutkitaan erilaisia päätöksentekomalleja. Tarkoituksena on selvittää mitä päätöksentekomalleja voidaan käyttää peltoviljelyn ohjausjärjestelmissä, jotka käyttävät hyväkseen mittaustuloksia pellon eri kohdista. Ongelmana on päättää milloin peltokoneiden pitää tehdä mitäkin pellon hoitoon liittyviä toimintoja ja minkälaiselle alueelle mikäkin toiminto tehdään. Tutkimus on tehty osana AutoCrop -projektia, joka on yhteishanke Helsingin yliopiston Agroteknologian laitoksen kanssa. Tutkimuksen avuksi on toteutettu simulaattori, jolla voidaan simuloida erilaisten maatilojen peltojen

kehitystä erilaisissa olosuhteissa. Agroteknologian laitoksen vastuualueena oli toteuttaa kasvimalli, jonka avulla pystytään simuloimaan muutamien neliömetrien kokoisen homogeenisen peltoalueen kehitystä.

Diplomityön tavoitteena oli selvittää tiettyjen päätöksentekomallien soveltuvuutta tiettyihin peltokasvin hoitoa koskeviin päätöksiin ja kehittää algoritmi, jolla pystytään määrittämään, minkälaiselle alueelle tarvittava toimenpide tulee tehdä. Työssä tutkitaan kahdenlaisia päätöksentekomalleja. Toinen optimoi haluttuja suureita laskemalla odotusarvoja ja valitsee parhaan olemassa olevista vaihtoehdoista. Tämän mallin käyttöä tutkitaan lannoituksen ja sadonkorjuun suunnittelussa. Toinen päätöksentekomalli käyttää sumeaa logiikkaa. Sitä tutkitaan rikkakasvien ja viljatautien torjunnan suunnittelussa. Näiden päätöksentekomallien ohella selvitetään mahdollisuutta yhdistää simulaattoriin komponentit, joiden avulla voidaan tutkia peltoviljelyn logistisia ongelmia.

Simulaattorin pääohjelma on kehitetty tätä diplomityötä varten Microsoft Visual Studio -kehitysympäristössä, käyttäen C#-kieltä. Peltokasveja simuloidaan Simulinkillä tehdyllä simulointimallilla, joka on käännetty C++ -kieliseksi ohjelmakirjastoksi. Simulaattoriin on toteutettu myös säägeneraattori Matlab-ohjelmalla ja se on koostettu Matlabin .NET koostajalla. Tämän jälkeen se on voitu integroida pääohjelmaan. Skenaarioiden paikkatiedot on määritetty ArcMap:in avulla. Paikkatiedot sisältävät peltojen, metsien ja teiden muodot ja sijainnit. ArcMapilla lasketaan myös kuinka paljon metsät varjostavat peltoja. Tulokset kirjoitetaan SQL-serverille taulukkoon joka on ArcGIS:n tukema. Sielät ne pystytään hakea ArcGIS:n visualisointivälineiden käyttöön.

Ohjelma käsittelee peltoja rastereina, joissa jokainen rasterisolu tai spatiaalielementti on viisi kertaa viiden metrin kokoinen peltopala. Jokaista solua simuloidaan erikseen simulointimallilla, jolloin pystytään näkemään pellon alueelliset vaihtelut. Tässä työssä ei tutkita eikä muutenkaan kiinnitetä huomiota peltokoneiden ajolinjoihin, sillä tästä aiheesta on jo tehty kattavaa tutkimusta (Oksanen 2007). Ajolinjat määrävä tekoäly oletetaan sulautetuksi jokaiseen työkoneeseen, samoin kuin taito liikkua teillä ja varastorakennuksissa.

2 Kasviviljelysimulaattorit ja päätöksentekomallit

Peltoviljelysimulaattoreita on ollut jo pitkään. Ensimmäiset mallit, joiden avulla voitiin hallita ja suunnitella viljelyä, tehtiin 1980 –luvulla (Rotz 2008, Yin ja van Laar 2005, Stöckle et al. 2003). Suurimmassa osassa simulaattoreista on oma maaperä-, kasvi-, sää-, ja päätöksentekomalli (Stöckle et al. 2003, Eriksson et al. 2005, Larsbo ja Jarvis 2003, Jones et al. 2003, Hill 2006, Ecresten 2004, Wang et al. 2002, Eckersten et al. 2006). Kehittyneemmissä järjestelmissä on myös mallit tuholaisille, taudeille ja mikroilmastolle (Stöckle et al. 2003, Eriksson et al. 2005, Jones et al. 2003). Tavallisesti peltosimulaatiomallit laskevat ulostulot vasteena tietyille sisäänmenoille, jotka ovat mittauksia tai estimaatteja tietyistä tutkimusalueen pisteistä.

Maaperämallit seuraavat pääsääntöisesti ominaisuuksia, jotka ovat olennaisia viljelyn kannalta. Tällaisia ovat esimerkiksi ravinnemäärät, kosteus ja maan lämpötila (Stöckle et al. 2003, Eriksson et al. 2005, Larsbo ja Jarvis 2003, Jones et al. 2003, Hill 2006, Ecresten 2004, Eckersten et al. 2006). Malleissa on usein kerrosmainen rakenne ja seurattavat ominaisuudet, kuten kosteus ja lämpötila, liikkuvat kerroksien välillä (Stöckle et al. 2003, Larsbo ja Jarvis 2003, Jones et al. 2003). Mallien maa on kuitenkin tasaista ja homogeenistä, eli maassa ei ole korkeuseroja ja koko alue on yhtä samaa maalajia.

Kasvimallit simuloivat kasvin kasvamista ja siihen liittyviä prosesseja, kuten yhteyttämistä ja ravinteiden käyttöä. Usein kasvimallit on tarkoitettu tietyn kasvin kasvun laskemiseen, mutta olemassa on myös yleisempiä malleja. Esimerkiksi CERES-malliperhe sisältää mallit vehnälle, ohralle, maissille, soijalle, riisille, tomaatille ja perunalle (Jones et al. 2003). CROPGRO-, STICS- ja GECROS-mallit taas saadaan

simuloimaan eri kasvien kasvua muuttamalla niiden parametreja (Yin ja van Laar 2005, Jones et al. 2003, Brisson et al. 2003).

Säägeneraattorin tehtävä on luoda realistinen sää simulaatiomallille. Se voi generoida esimerkiksi hetkittäistä sademäärää, auringon säteilyn voimakkuutta ja lämpötilaa. Joissain malleissa on lisäksi tuulennopeus, ilmankosteus, ilmanpaine ja päivittäiset minimi- ja maksimilämpötilat (Stöckle et al. 2003, Jones et al. 2003). Säägeneraattoreiden luoma sää perustuu aina alueellisiin tilastoihin.

Riskejä ja päätöksentekoa lähestytään tavallisesti odotusarvojen kautta. Odotusarvojen laskemiseen on monia eri menetelmiä kuten bayes-verkko, todennäköisyyspuu ja analyttinen hierarkiaprosessi (Hardaker 2004, Malczewski et al. 1999, Sørensen 1999). Nämä menetelmät ovat usein yleispäteviä ja toimivat maataloudessa niin kylvön ajoittamisessa kuin päätöksessä kannattaako ottaa suu- ja sorkkatautivakuutus maatalan eläimille. Joskus optimointiongelmat ovat kuitenkin niin monimutkaisia, että niiden eksakteja odotusarvoja on hyvin vaikea laskea. Tällöin voidaan hakea ongelman optimaalista ratkaisua iteratiivisesti simulaattoreiden avulla.

Peltoviljelyssä yksi merkittävimmistä kustannuksista syntyy eri operaatioiden huonosta ajoittamisesta. Esimerkiksi liian myöhäinen kylvöhetki vähentää sadon määrää. Ajoittaminen helpottuu, kun on paljon työkoneita, mutta suurista kone- ja kuljettajakapasiteeteista seuraa myös kustannuksia. Kapasiteetin määrän ja operaatioiden ajoittamisesta syntyvien kustannusten suhde ei ole kuitenkaan lineaarinen, joten kustannusten suuruutta eri konekapasiteeteilla on vaikea ennustaa. Tästä johtuen on olemassa monia kapasiteetteja, joiden odotusarvokustannukset ovat suunnilleen samat pienimmät mahdolliset. Suuremmilla kapasiteeteilla vuosittaiset kustannusvaihtelut ovat

kuitenkin pienempiä ja näin ollen myös riskit ovat pienemmät. Kapasiteetin kannattaa siis olla suurin niiden kapasiteettien joukosta, jotka aikaansaavat minimikustannukset (Toro 2005). Konekapasiteettia pystyy vähentämään jonkin verran, jos monta maanviljelijää tekee yhteistyötä ja jakaa konekapasiteetin keskenään (Toro 2003).

3 Pellolla tehtävät operaatiot ja niiden toteuttaminen

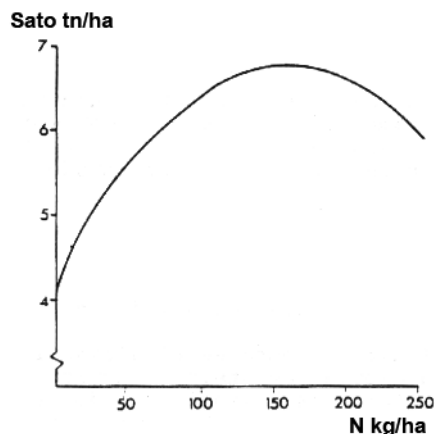
Viljanviljelyssä on karkeasti ottaen neljä erilaista operaatiota, jota pellolle tehdään. Nämä ovat kylvö, lannoitus, kasvinsuojelu ja sadonkorjuu (Varis 1987).

3.1 Kylvö

Suomen oloissa kylvön pitäisi tapahtua niin aikaisin kuin mahdollista. Lyhyen kasvukauden takia jokainen päivä on arvokas. Sulamisvedet on myös hyvä saada hyötykäyttöön aikaisin keväällä. Näistä syistä vilja kylvetään tavallisesti heti kun maa on niin kuivaa, että se kantaa traktorin (Varis 1987). Mikäli peltolohko sisältää useita maalajeja, korkeuseroja ja metsänreunoja, pellon eri kohtien vilja kypsyy eri aikoihin.

3.2 Lannoitus

Ravinteita on tyypillisesti hyvin niukasti Suomen maaperässä. Siksi lannoittaminen on yleensä välttämätöntä hyvien satojen saamiseksi (Saarela 1983). Typpi vaikuttaa eniten viljan kasvuun maassa olevista ravinteista (Varis 1987). Jyväsadon ja typpilannoituksen välistä riippuvuutta kuvaa alaspäin aukeava paraabeli (Cooke 1972). Kuvassa 1 havainnollistetaan tätä. Sadon maksimoimiseksi pitäisi siis lannoittaa juuri sen verran, että tavoitettaisiin paraabelin huippu. Lannoittaminen kuitenkin maksaa, joten lannoitetta ei kannata levittää, jos siitä aiheutuvat kustannukset ovat suuremmat kuin sen tuoma tuotto. Optimaalisessa lannoituksessa annetaankin hieman vähemmän lannoitetta, kuin paraabelin huipun saavuttaminen vaatisi.



Kuva 1: Typen vaikutus sadonmäärään (Cooke 1972)

Suomessa vakiintuneen viljelytavan mukaan kevätiljojen lannoite levitetään kylvön yhteydessä kokonaisuudessaan maahan ja vain syysviljoilla käytetään kasvukauden aikaista lisälannoitusta. Lannoituksen määrää rajoittavat EU:n ympäristötuen ehdot. Kevätiljoilla lannoituksen määrä perustuu tyypillisen kasvukauden olosuhteiden olettamiseen, vaikka optimaalinen lannoitemäärä riippuu tulevan kesän kosteusoloista (Seppänen 2008).

Lannoituksesta saa parhaan hyödyn, kun ravinteita annetaan oikeassa suhteessa, oikeaan aikaan ja kasvin todelliseen tarpeeseen perustuva määrä. Kun lannoitus tarkennetaan sadon määrän mukaan, niin ravinteet myös käytetään tehokkaasti, eikä niitä kerry tarpeettomasti maahan tai huuhtoudu vesistöön (Yara 2010.)

Kasvit tarvitsevat 16:ta eri ravinnetta kasvaakseen ja yhteyttääkseen. Kasvit saavat hiiltä, vetyä ja happea vedestä ja hiilidioksidista. Loput 13 ravinnetta kasvi ottaa maasta. Jokaisella ravinteella on kasvissa vähintään yksi tehtävä, jota mikään muu ravinne ei voi suorittaa. Jos kyseistä tehtävää ei hoideta, niin kasvin kasvu hidastuu ja siihen saattaa tulla kasvuhäiriöitä. Jos jokin ravinteista puuttuu, kasvi ei voi täysipainoisesti hyödyntää

mitään muitakaan ravinteita (Yara 2010.)

3.3 Kasvinsuojelu

Viljaa pitää suojella monenlaisilta haitoilta, kuten rikkakasveilta, taudeilta sekä tuhoeläimiltä ja hyönteisiltä. Näiden torjumiseen on monia eri keinoja (Varis 1987). Tässä työssä keskitytään ainoastaan rikkakasvien ja tautien kemialliseen torjumiseen. Tämä tarkoittaa, että niiden torjunta hoidetaan kokonaan ruiskuttamalla pellolle rikka- ja tautitorjunta-ainetta. Ruiskutusta edeltävä, sen aikainen ja sen jälkeinen sää vaikuttaa torjunta-aineen tehoon. Paras sää olisi lämmin, tyyni ja pilvipoutainen. Ilman suhteellisen kosteuden olisi hyvä olla korkea (Pessala 1983). Nyrkkisääntöinä on ollut, että rikkakasveja ruvetaan torjumaan, kun niitä on kämmenen alalla neljä tai enemmän. Tauteja torjutaan taas, kun joka viidennessä kasvissa kolmanneksi ylimmällä lehdellä on tautipesäke (Hyytiäinen et al. 1999). Myös viljan kehitysaste pitää ottaa huomioon myrkyttäessä (Seppänen 2008).

3.4 Sadonkorjuu

Sadonkorjuun ajoittaminen riippuu merkittävästi siitä, mitä kasvia viljellään (Varis 1987). Tässä työssä keskitytään korsiviljoihin. Viljakasvien kasvu pysähtyy tähkän tai röyhyn muodostumiseen. Pölytyksen jälkeen jyvään alkaa kerääntyä ravintoaineita ja sen kosteuspitoisuus laskee. Kasvi niin sanotusti tuleentuu, eli sen jyvät kypsyvät. Sadonkorjuussa yritetään maksimoida sadonmäärää ja leipäviljojen osalta sakolukua, mutta samalla jyvien kosteuden olisi hyvä olla mahdollisimman alhainen (Varis 1987). Korkea kosteusprosentti lisää merkittävästi kuivatuksessa tarvittavan energian määrää, joten mitä kalliimpaa polttoöljy on, sitä tärkeämpää on korjata sato mahdollisimman

kuivana. Tämä on tärkeä seikka etenkin Suomessa, jossa kasvukausi on lyhyt eikä voida odottaa seuraavaa poutajaksoa, jolloin aurinko ja tuuli kuivattaisivat sadon pellolla. Sakoluku tarkoittaa kuinka hyvin jyivistä jauhettu jauho soveltuu leivontaan. Jos sakoluku on liian pieni, leipä ei kypsy sisältä vaan jää kosteaksi ja taikinamaiseksi. Tämä johtuu jauhojen entsyymiaktiivisuudesta, joka taas riippuu viljan itämisasteesta (Evira 2009). Myös muita ravinneainepitoisuuksia saatetaan säädellä sakoluvun sijaan, jos viljaa ei käytetä leivän tekemiseen. Mallasohralla esimerkiksi pyritään minimoimaan proteiinipitoisuutta, koska se vaikeuttaa mallastusta. Eri viljakasvien sato ja ravinneainepitoisuudet kehittyvät ja kasvavat eri tavoilla ja vaiheissa. Jotkin viljat pystytään myös korjaamaan huomattavasti kosteampana kuin toiset ilman pilaantumisvaaraa. Viljan käyttötarkoitus vaikuttaa siihen kuinka näitä kolmea suuretta painotetaan. Näin ollen sadonkorjuun optimaalinen aika riippuu viljanlaadusta ja sen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi mallasohran puinti aloitetaan, kun kosteus on laskenut alle 25 prosentin (Varis 1987).

Sää vaikuttaa ratkaisevasti jyvän kosteuteen. Kuivalla ja tuulisella ilmalla jyvä kuivuu nopeasti ja sateella se kostuu. Puinti keskeytyy sateen tullessa tai koneiden mennessä rikki. Korjuuajankohdan optimointi näiden kaikkien epävarmuuksien kanssa on hyvin monimutkaista. Tähän ongelmaan on kehitetty bayes verkkoon pohjautuva simulaatiomalli (Sørensen 1999).

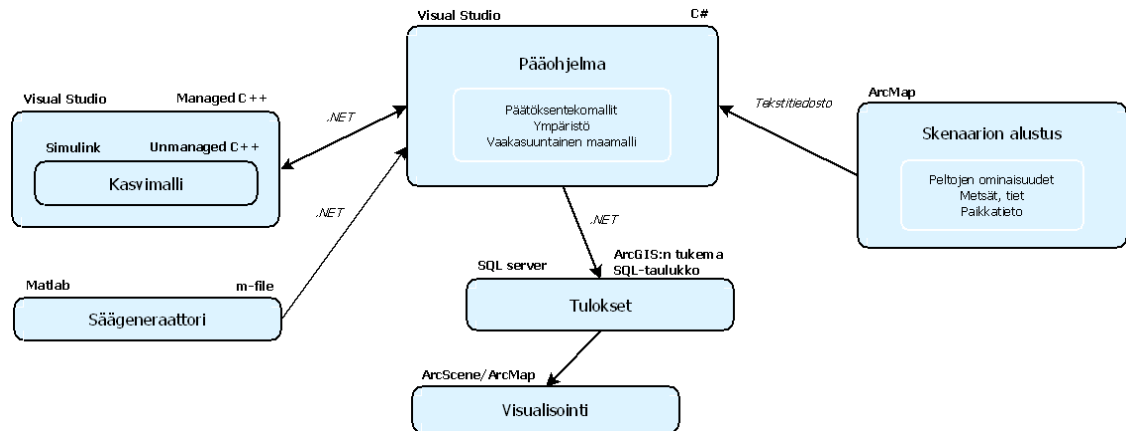
4 Simulaattorin toteutus

Simulaattorin tarkoituksena on simuloida maatilaa, johon kuuluu monia peltoja ja työkoneita. Maatilaan kuuluu myös siiloja viljan varastoimiseksi, varastoja lannoitteelle, kasvinsuojeluaineille ja siemenille sekä halli työkoneille. Näitä kaikkia yhdistää tieverkosto. Peltojen ravinnearvot ja rikkasiemenmäärät voi asettaa sen perusteella, mitä on mitattu oikeasta pellostä tai arpomaan siten, että saadaan helposti aikaan realistinen skenaario. Simulaattori generoi myös säätä todenmukaisesti.

Työkoneet oletetaan traktorin kaltaisiksi autonomiseen työhön soveltuviksi kokonaisuuksiksi, joihin on integroitu tekniikka ja tekoäly kuinka liikkua maanteilla, varastoissa ja pellolla. Näin järjestelmä toimii maatioilla, joilla koneet ovat tekoälyn omaavia robotteja, tiloilla joilla koneet ovat perinteisiä ihmisten ohjaamia traktoreita ja tiloilla joilla kumpiakin on sekaisin. Osa työkoneista pystyy kylvämään, osa lannoittamaan, osa ruiskuttamaan ja osa korjaamaan satoa. Jotkin koneista voivat pystyä myös moneen eri operaatioon.

Kuvasta 2 näkee simulaattorin rakenteen. Pääohjelma on tehty C# :lla käyttäen Microsoft Visual Studio -kehitysympäristöä. Peltokasvien simulointimalli on tehty simulinkissä, mistä se on käännetty C++ -kieliseksi ohjelmakirjastoksi. Tämä on yhdistetty erillisen ohjelmakääreen avulla pääohjelmaan. Säägeneraattori on toteutettu Matlab-ohjelmalla ja koostettu Matlabin .NET koostajalla, jonka jälkeen se on integroitu pääohjelmaan. Peltojen, metsien ja teiden fyysiset koot ja sijainnit määritetään ArcMap:in avulla. Samalla työkalulla lasketaan myös peltojen aurinkoisuudet. ArcMapissa määritetyt

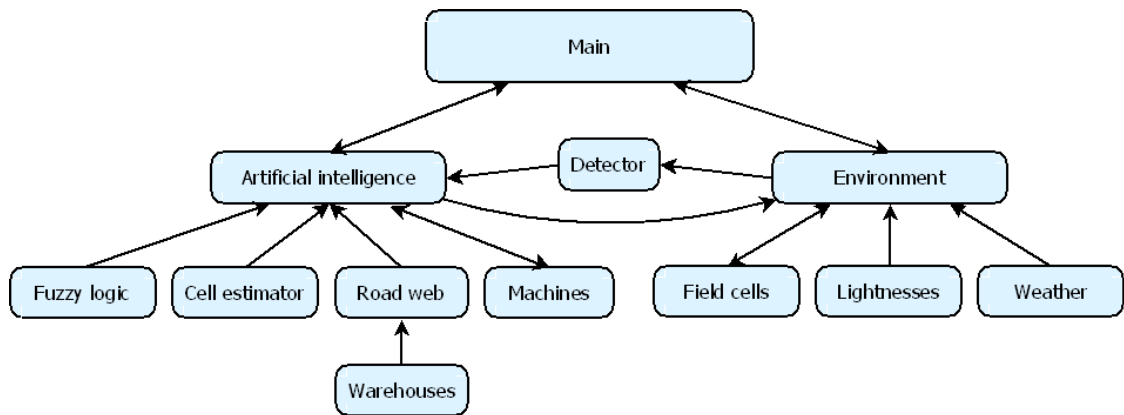
tiedot tuodaan tekstitiedostojen avulla itse ohjelmaan. Ohjelma kirjoittaa saatuja tuloksia SQL-serverille ArcGIS:n tukemaan taulukkoon, mistä ne saa haettua ArcGIS:n visualisointivälineiden käyttöön.



Kuva 2: Kuvassa ohjelman rakenne jaoteltuna osiin sen mukaan millä tavalla mikäkin osa on toteutettu.

Pääohjelmassa on toteutettuna tekoäly, joka päättää, koska pellolla pitää tehdä mitään operaatioita. Jokaiselle peltosolulle annetaan syötteen, näiden päätöksien sekä skenaarion ja säägeneraattorin antamien tietojen perusteella. Ohjelma tallentaa jokaisen peltosolun simulaatiomallin antamat tulosteet SQL-tietokantaan, josta ne saa vietyä ArcGISiin visualisoitaviksi.

Luokkahierarkia jakautuu tekoälyosaan (Artificial Intelligence) ja ympäristöosaan (Environment), kuten kuvasta 3 näkyy. Oikeassa maalilmassa tekoäly saisi tietoa ympäristöstä antureiden ja estimaattien kautta. Niissä voi olla paikoitellen kohinaa tai vääristymää. Tätä generoidaan simulaattorissa erillisessä luokassa (Detector). Tekoäly antaa ympäristölle tietoa, mitkä peltosolut operoidaan milloinkin ja miten. Tämä tieto ei vääristy matkalla, joten sen voi viedä suoraan luokasta toiseen ilman välikäsiä. Tieverkosto (Road web) sisältää siilot, varastot ja suojat koneille (Warehouses), sillä ne sijaitsevat käytännössä aina teiden päässä tai solmukohdissa.



Kuva 3: Ohjelma jakautuu kahtia ympäristö- ja tekoälyosaan. Tekoäly pitää sisällään infrastruktuurin ja resurssit sekä päätöksentekomallit. Ympäristö puolestaan sisältää peltojen solut, valoisuustaulukot ja säägeneraattorin. Tekoälyn ympäristöstä saama tieto tulee aina antureiden ja estimaattien kautta, joten siinä on paikoitellen kohinaa ja vääristymää. Ympäristön tekoälyltä saamat muokkaus inputit taas voidaan viedä suoraan ilman välikäsiä.

4.1 Skenaarion alustus

Skenaarion alkuarvot annetaan ArcGIS-ohjelman avulla. Siinä määritetään peltojen muodot, korkeusvaihtelut ja sijainnit sekä ravinnearvot ja pellon eri kohdissa olevien rikkakasvien siementen määrät, samoin kuin tieverkosto ja siilojen sijainnit. Pellot jaetaan neliön muotoisiin soluihin, joiden sivu on viisi metriä ja joiden tilaa simuloidaan yksitellen, jolloin nähdään peltojen tilojen sisäiset vaihtelut. Myös peltojen ympärillä olevat metsät määritetään ja niiden avulla lasketaan, kuinka paljon aurinko paistaa minäkin päivänä tietylle peltosolulle.

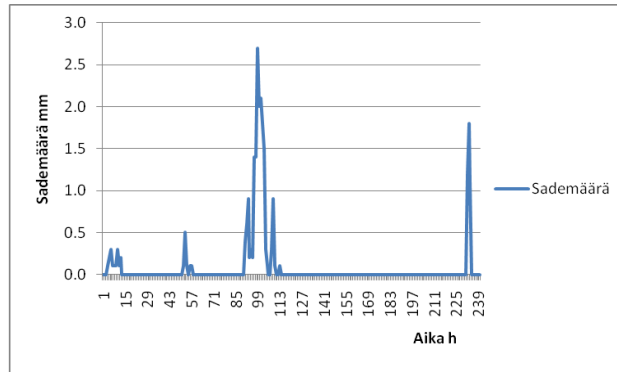
Alkuarvot voidaan antaa todellisten mittausten perusteella, siten että skenaarion peltotila vastaa oikeata maatilaa, tai ne voidaan arpoa, jolloin saadaan helposti aikaan kuvitteellinen skenario. Arvottavia parametreja ovat korkeusvaihtelut, maan tyyppi-, fosfori- ja kaliumpitoisuudet, maan kosteus alkuhetkellä, rikkasiemenpankit kolmelle erilaiselle rikkakasville (peltopillikkeelle, peltomataralle ja jauhosavikalle) sekä maalajityyppi,

joka määrää miten vesi pääsee liikkumaan siinä. Korkeuksia, ravinnepitoisuuksia, maan kosteutta ja rikkasiemenpankkeja arvottaessa käytetään normaalijakaumaa, jota niiden tiedetään suurinpiirtein noudattavan. Suureiden keskiarvot ja varianssit pystytään myös perustamaan tutkimuksiin tai arvioimaan karkeasti.

Maalajeilla on kuusi erilaista parametria, jotka vaikuttavat siihen imeytyneen veden liikkeisiin. Nämä parametrit riippuvat toisistaan siten, että ne ovat konstruoitavissa karkeasti ottaen kahdesta tasajakautuneesta satunnaisluvusta. Eri maalajit ja niiden parametrit saatiin Karvosen ja Variksen kirjasta *Mathematical models in crop production* (1992). Maalajin parametrien arpomisessa käytetään tasajakaumaa, jolloin tiedetään varmasti missä rajoissa se liikkuu. Tätä menetelmää käytetään myös sen takia, että maalajien vaihtelun noudattamaa jakaumaa ja tunnuslukuja on hyvin vaikeaa arvioida ilman laajempaa tutkimusta ja perehtyneisyyttä aiheeseen.

4.2 Sään generoiminen

Sään generoimiseen on käytetty Ilmatieteen laitokselta saatuja tuntikohtaisia säätietoja. Näistä on laskettu todennäköisyysarvot, edellisen tunnin sään ja tämän hetken sään välille. Esimerkiksi kuinka suurella todennäköisyydellä jonain tuntina sataa 0,3mm, jos edellisenä tuntina on satanut 0,1 mm. Saatujen tietojen avulla arvotaan todellisuudenmukaisesti painotettu sää jokaiselle tunnille. Kuvasta 4 näkyy kuinka sadejaksot ovat ryhmittyneet. Malli vastaa Sørensenin väitöskirjassaan *A Bayesian Network Based Decision Support System for the Management of Field Operations* käyttämää säämallia (Sørensen 1999).



Kuva 4: Tuntikohtainen sademäärä Kaisaniemestä kymmenenpäivän ajalta.

Yhtenä ongelmana on, että dataa siitä mitä tapahtuu hyvin rankan sateen jälkeen, on hyvin vähän. Tämä johtuu siitä, että todella rankkoja sateita on erittäin harvoin. Ongelmaa on paikattu olettamalla, että seuraavan tunnin odotusarvot rankkojen sateiden jälkeen eivät muutu merkittävästi, jos rankkasateen sademäärä muuttuu vähän. Esimerkiksi seuraavan tunnin todennäköisyydet ovat hyvin lähellä toisiaan riippumatta siitä, sataako edellisen tunnin aikana 4,0 mm vai 5,3 mm. Näin yhdessä sademäärätapauksessa voidaan käyttää useiden sademäärien dataa hyväksi, jolloin kohinaa saadaan vaimennettua.

Sademäärien todennäköisyydet vaikuttavat seuraavan silmämääräisesti kaikissa tapauksissa Poissonin jakaumaa, joka onkin sopiva kuvaamaan satunnaisia muuttujia (Tattelman ja Knight, 1988). Jos sadegeneraattoria haluttaisiin parantaa, voitaisiin todennäköisyyksiin sovittaa Poissonin jakauman mukaiset käyrät. Tämä ei ole kuitenkaan tarpeellista tämän diplomityön puitteissa.

Liitteessä 1 on vertailtu generoituja ja oikeita sademääriä keskenään. Generoidut sateet vastaavat toisiaan silmämääräisesti. Ainoa puute on, että generoidut sateet ovat jakautuneet tasaisesti koko ajalle, kun taas oikeat sateet keskittyvät enemmän tietyille ajanjaksoille.

Lämpötilan generointi tapahtuu lähes samalla tavoin kuin sademäärän generointi. Erona on, että ilmatieteen laitoksen lämpödataan on ensin sovitettu kaksi sinikäyrää, jotka ovat muotoa:

$$a * \sin(b * X + c)) + d$$

Käyrät sovitetaan siten, että toinen kuvaa vuodenajan ja toinen vuorokauden ajan vaikutusta lämpötilaan. Tämän jälkeen lämpödata normeerataan niin, että jokaisen tunnin lämmöstä vähennetään sen vuorokauden- ja vuodenajan normaalilämpö. Normaalilämpö saadaan kahden edellä mainitun sinifunktion summasta. Saadusta normeeratusta datasta tehdään samanlainen taulukko kuin sademäärästäkin. Tästä taulukosta pystyy generoimaan kohinaa, joka vastaa oikean lämpötilan normeerattua kohinaa. Kun tämä lasketaan yhteen kahden sinifunktion summaan jokaiselle tunnille, saadaan aikaan todenmukaisia lämpötilavaihteluita.

Kumpikaan lämpötilavaihtelu ei noudata tarkasti sovitettuja sinifunktiota. Kuitenkin ne sopivat dataan tarpeeksi hyvin tämän projektin puitteissa. Liitteessä 2 on kuvaajia lämpötilasta ja sinifunktiosta.

Myös pilvisyyttä pystytään generoimaan. Ilmatieteenlaitokselta saadussa datassa on tuntikohtaiset auringonpaistearvot, jotka ovat välillä 1 ja 0. Näistä generoidaan pilvisuus samaan tapaan kuin sade ja lämpötilakin generoitiin. Tässä pitää ottaa lisäksi huomioon, että yöllä auringonpaistearvo on 0 riippumatta taivaan pilvisyydestä. Liitteessä 3 on auringon nousu- ja laskuajan kaavat. Tämä parametri arvo on kuitenkin jätetty simulaattorissa käyttämättä.

5 Virtausmalli

Kasvisimulaatiomalli sisältää maaperämallin, jossa on algoritmi veden pystysuoralle virtaukselle. Vaakasuora virtaus toteutetaan pääohjelman ympäristökomponentissa. Seuraavaksi esitelty virtausmalli on Karvosen ja Variksen kirjasta Mathematical models in crop production (1992).

Maaveden potentiaali ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$) lasketaan kaavasta:

$$h(\theta) = -e^{\sqrt{-\ln(\theta^{-1} \text{soil}_{SWC})} \text{soil}_{\mu}^{-1}}$$

missä soil_{SWC} ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$) ja soil_{μ} ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$) ovat maaperän ominaisuuksien parametreja ja θ on kerroksen vesipitoisuus ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$)

Hydraulinen veden johtavuus ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$) on

$$K(h) = \text{soil}_{ks} * e^{(\text{soil}_{alfak} * h)}, h < \text{soil}_{h_max}$$

$$K(h) = \frac{\text{soil}_{ak}}{(-h)^{1.4}}, h \geq \text{soil}_{h_max}$$

missä soil_{ks} ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$), soil_{ak} ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$), soil_{alfak} ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$) ja soil_{h_max} (m) ovat maaperän parametreja ja h on maaveden potentiaali.

Näistä saadaan veden virtaus ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$) kahden alueen a ja b välillä

$$q = -\frac{K(h_a) + K(h_b)}{2} \left(\frac{h_b - h_a}{dz} - 1 \right)$$

missä K on hydraulinen vedenjohtavuus, h on maaveden potentiaali ja dz on alueiden välinen korkeusero (m). Saatu virtaus kertoo millä nopeudella vesi liikkuu maan sisällä.

6 Kehitetyt päätöksentekomallit

Simulaattorin tekoälyn pitää tehdä päätös kaikista pellolla tehtävistä operaatioista. Erilaisia vaihtoehtoja päätöksentekoon ovat muun muassa odotusarvoihin pohjautuvat menetelmät, sumea logiikka, neuroverkot ja geneettiset algoritmit.

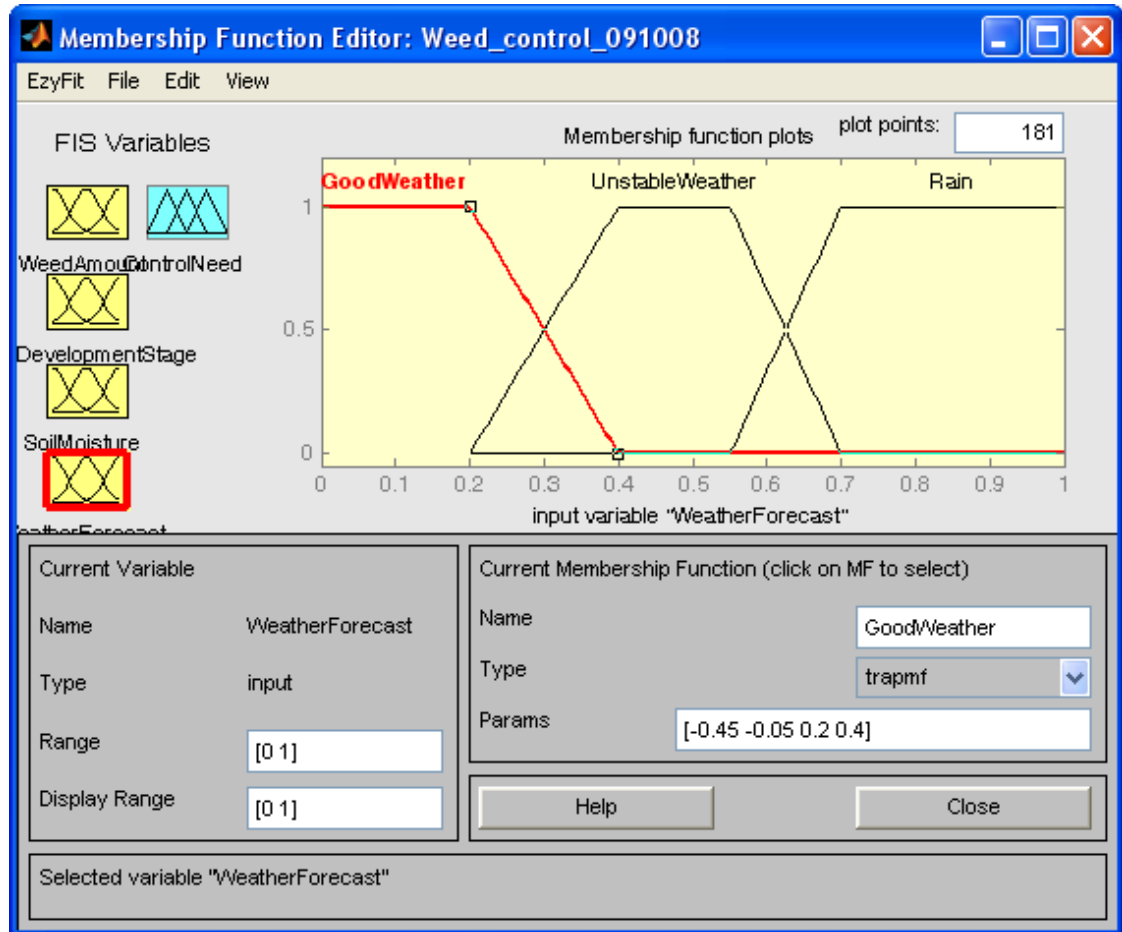
Neuroverkot ja geneettiset algoritmit vaativat kalibrointiin hyvin monia ajokertoja. Simulaattorin läpi ajaminen kestää melko kauan, joten näiden menetelmien käyttäminen ei ole mielekästä. Sumeaa logiikkaa käytetään yleisesti ongelmiin, joissa esiintyy epätasällisyyttä tai epävarmuutta jossain muodossa. Se toimii hyvin myös monen tavoitteen päätöksenteossa (Isomursu 1993). Tästä syystä tämä menetelmä on valittu käytettäväksi päätöksentekomallina kasvinsuojelussa. Perinteinen tapa tehdä päätöksiä maataloudessa on laskea eri vaihtoehtojen odotusarvot ja valita niistä paras. Odotusarvot saadaan tässä tapauksessa helposti käytössä olevan simulaattorin avulla. Tämä periaate on valittu käytettäväksi menetelmäksi, kun päätetään lisälannoituksesta ja sadonkorjuusta.

Kylvö ei tarvitse kovin monimutkaista mallia. Riittää että maan kosteutta tarkkaillaan ja kylvö hoidetaan heti, kun maan kosteuspitoisuus on laskenut tarpeeksi alas.

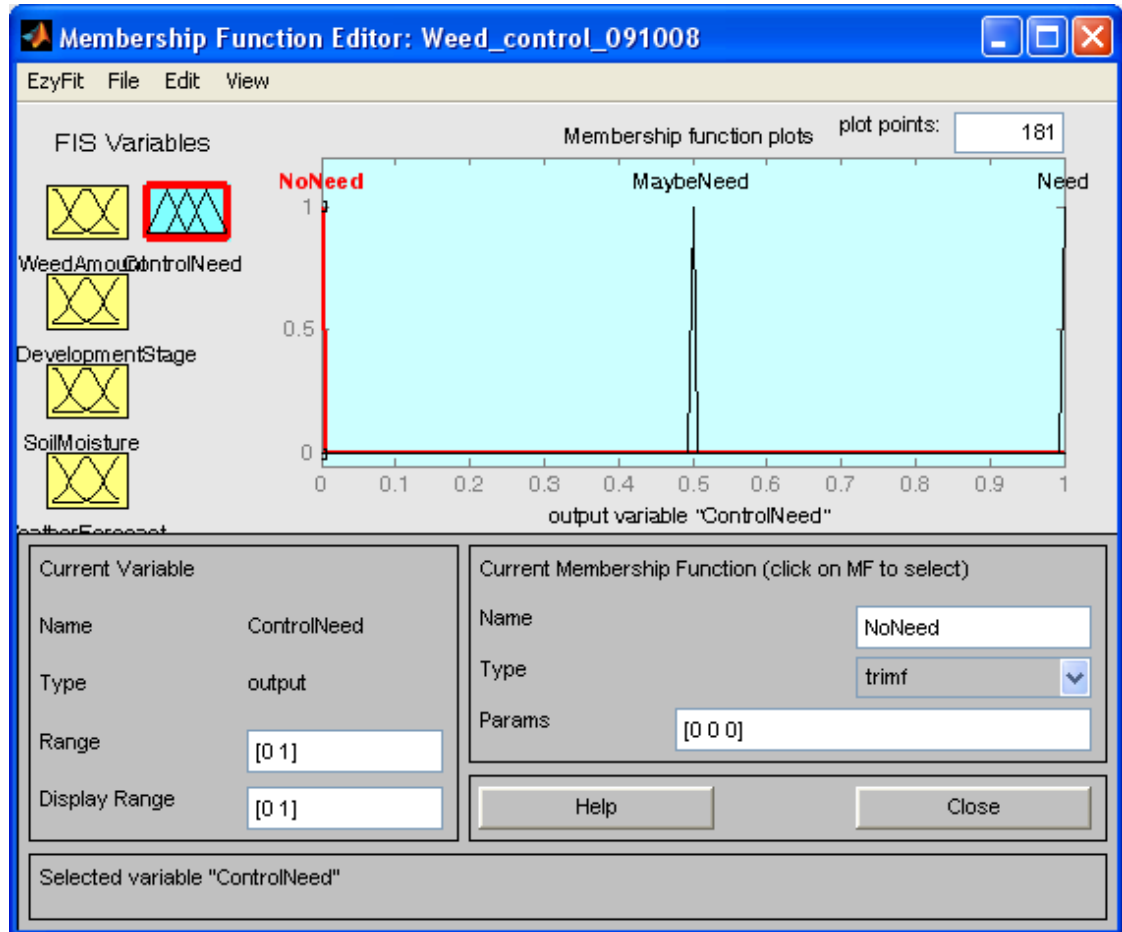
6.1 Sumea logiikka

Sumea logiikka toteutetaan Matlabin Fuzzy Logic Toolbox –työkalun avulla. Sillä pystytään tekemään kyseisen päätöksentekomallin helppokäyttöisen editorin avulla, jossa on graafinen käyttöliittymä. Tämä tallentaa luodun säätimen parametrit tekstitiedostoon, jonka avulla simulaattori pystyy luomaan samanlaisen säätimen. Editorissa on myös hyvät työkalut säätimen testausta varten.

Logiikkasäännöt tautien ja rikkakasvien torjuntaan tätä työtä varten on kehitetty yhdessä Agroteknologian laitoksen kanssa. Käytettäväksi malliksi valittiin Mamdanin malli, sillä siinä on myös selkeytysosa on helposti ymmärrettävissä ilman korkeaa matemaattista osaamista. Sumeutus- ja selkeytysosa sekä säännöt ovat samat tautien ja rikkojen torjunnalle. Myös parametrit ovat käytännössä samat kummallekin. Nämä ovat tautien- tai rikkojen määrä, viljan kehitysaste, maan kosteus ja sääennuste. Sumeutusosa on toteutettu trapetsoideilla ja selkeytys singletonilla. Singletonien käyttö tekee selkeytysosasta helpommin ymmärrettävän. Niistä näkee vaivatta, mikä on suurin ja mikä pienin ulostulon arvo. Myös erilaisten yhdistelmien massakeskipiste on nähtävissä helposti. Kuvissa 5 ja 6 on yksi trapetsoideilla toteutetuista sumeutusfunktioista ja singletonilla toteutettu selkeytysosa.

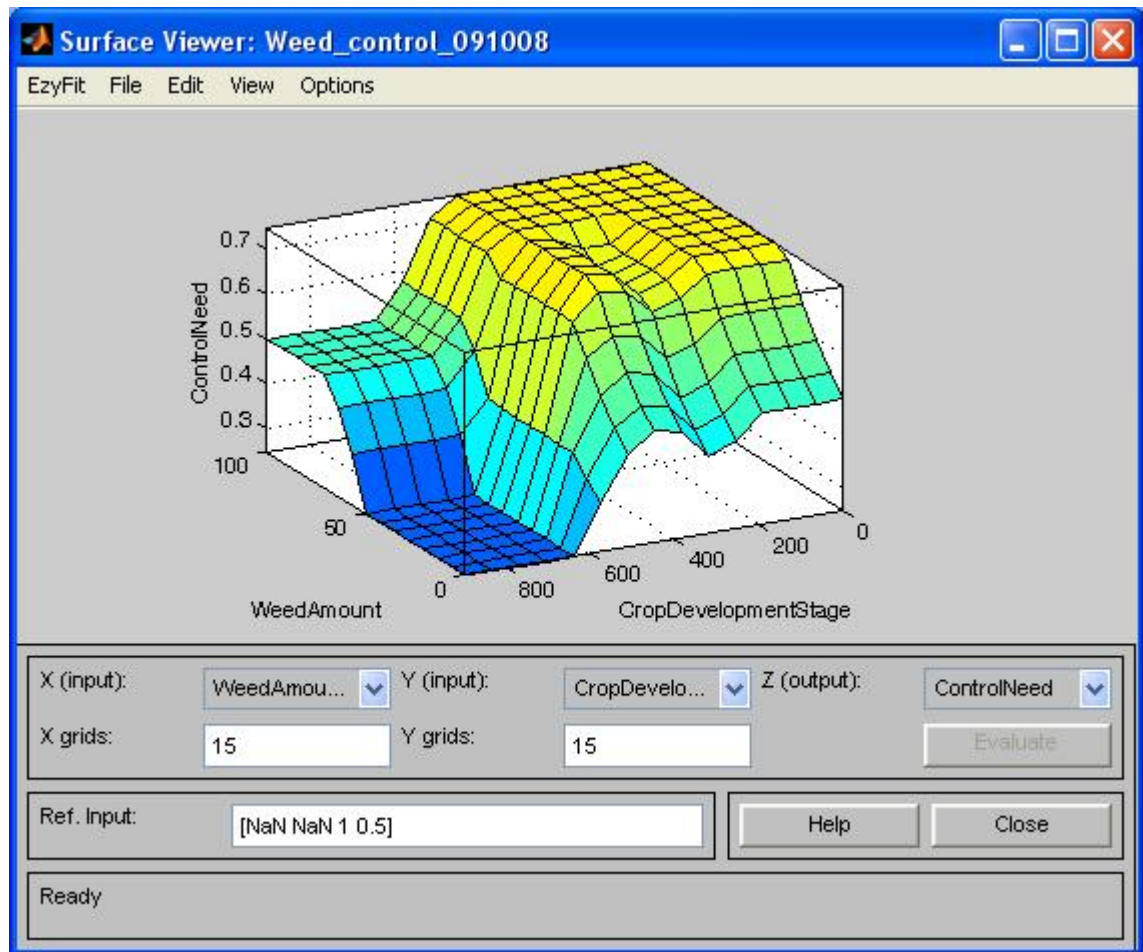


Kuva 5: Sumean säätimen sumeutusosa on toteutettu trapetsoideilla.



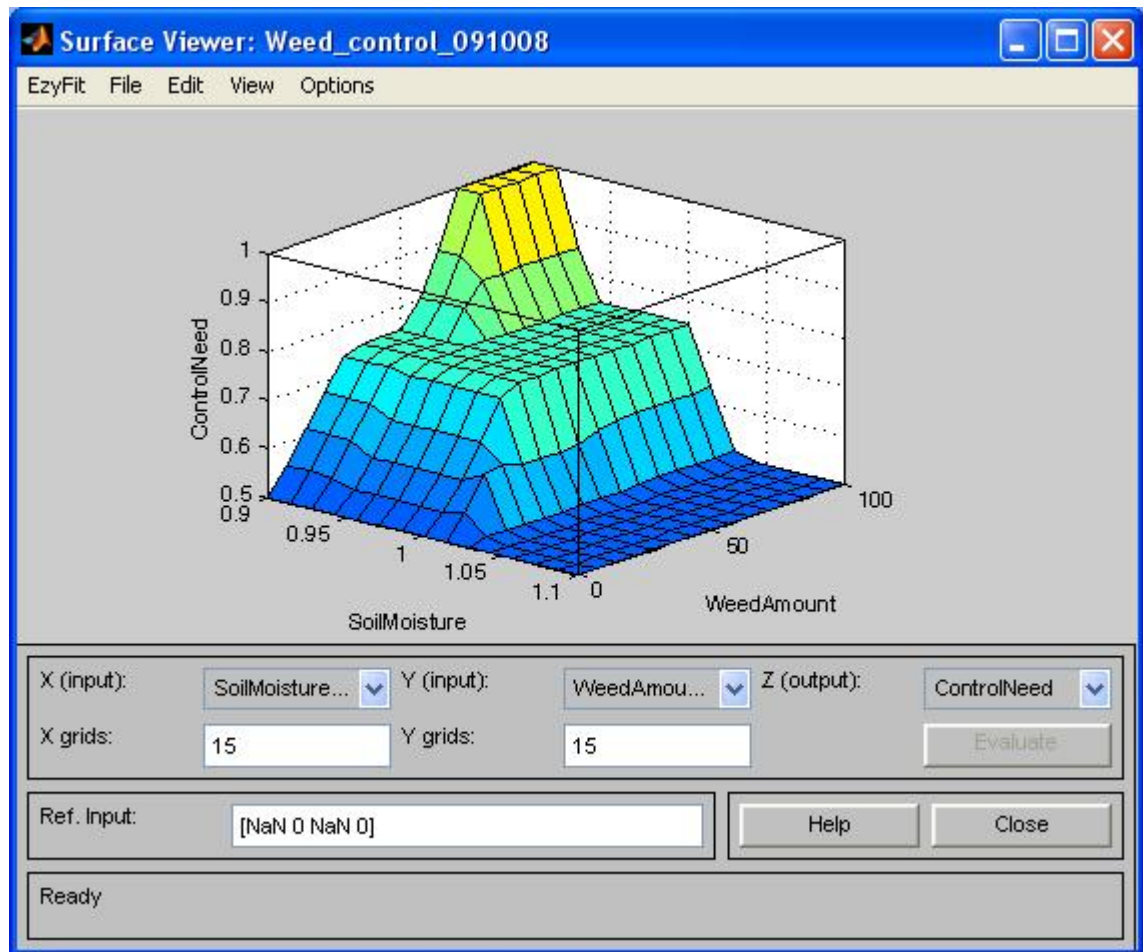
Kuva 6: Sumean säätimen selkeytysosa on toteutettu singletonilla.

Toteutetun säätimen ulostulo on aina nollan ja yhden välissä. Jos arvo on 0,5 tai vähemmän, torjuntaa ei tule suorittaa. Jos se on yli 0,5, torjuntaa voidaan harkita ottaen huomioon vapaana oleva konekapasiteetti ja muut logistiikkaan vaikuttavat seikat. Pintojen jatkuvuus on varmistettu työkalun Rule Viewer –näkymästä. Kuvassa 7 on tällainen näkymä. Siitä näkee, minkälainen ohjaussuureen määrittämä pinta on rikkojen määrän ja viljan kehitysasteen funktiona. Kuvasta näkee, että funktion kuvaajan pinta on jatkuva eikä siinä ole teräviä kulmia. Ohjaussuure suurenee ja pienenee myös loogisiin suuntiin, joten voidaan olettaa, että malli toimii.



Kuva 7: Sumean säätimen ohjauksen määrittämä pinta rikkaruohojen määrän ja viljan kehitysasteen funktiona. Ohjaussuure putoaa alle arvon 0,5 kun viljan kehitysaste on korkea ja kun rikkakasvien määrä on pieni. Viljan kehitysasteen ollessa matala ja rikkakasvien määrän ollessa suuri käy päinvastoin.

Myös rajatapaukset pystytään tarkistamaan helposti pintojen avulla. Kuvassa 8 on esimerkiksi pinta, joka kuvaa ruiskutuksen ohjaussuuretta maan kosteuden ja rikkojen määrän funktiona sellaisessa tapauksessa, jossa viljan kehitysaste on minimissä ja sääennuste on suotuisimmillaan. Kuvasta näkyy, kuinka ohjaussuure laskee arvoon 0,5, kun maan kosteuspitoisuus suurenee, vaikka rikkoja olisi maksimimäärä ja muutkin sisääntulot ovat suotuisimmillaan ruiskuttamiselle.



Kuva 8: Ohjaussuure on aina 0,5 tai alle, kun maan kosteuspitoisuus menee tietyn kosteusrajan yläpuolelle. Näin pellolle ei mennä koskaan, kun maa on liian märkää.

6.2 Odotusarvomenetelmä

Lannoituksen odotusarvomenetelmässä tarkastellaan yhtä erillistä peltosolua, jolla on samat lähtöarvot kuin koko peltolohkolla keskimäärin. Tätä solua simuloidaan eteenpäin siten, että sille on annettu lannoitetta ja siten ettei ole. Jos kasvin kasvu voimistuu niin paljon, että sadon kasvanut määrä kattaa lisälannoituksesta aiheutuneet kustannukset, niin lannoitus on kannattavaa tehdä. Lisäksi tarkastellaan kuinka nopeasti kasvu alkaa

voimistumaan. Jos lannoitetun ja lannoittamattoman solun kehityksessä ei ole eroa vielä kahteen viikkoon, voidaan päätellä, että ravinteet riittävät kasville vielä toistaiseksi eikä lisälannoituksella ole kiirettä.

Käytetyn lannoitteen hintana käytetään arvoa 250 €/tn mikä perustuu Tigoteam Oy:n lannoitehintoihin (Tigoteam 2009). Lannoitteen levityshintana käytetään arvoa 13,2 €/ha mikä on arvioitu pintalevityksen kustannus (Palva 2009). Viljan hintana käytetään 117.9 €/tn joka oli vehnän hinta vuonna 2009 (Törmä 2009).

Vilja kasvaa hitaimmin ja vaatii näin vähiten ravinteita, kun on kuivaa. Koska lannoitteen määrää on tarkoitus minimoida, lisälannoittamisen tarvetta tarkastellaan tapauksessa, jossa kasvi tarvitsee lannoitetta vähimmäismäärän. Tästä syystä tarkasteltavaa peltosolua simuloidaan siten, että sen saama kuukausittainen vesimäärä on 14,1 mm joka on vuosien 1971 – 2000 kuivimman kesäkuun sademäärän summa (Kilpeläinen 2006).

Sadonkorjuun ajoittaminen tapahtuu luomalla jokaista peltoa vastaavat erilliset peltosolut, joiden lähtöarvot ovat samat kuin pellolla keskimäärin, ja simuloimalla niitä eteenpäin kaksi viikkoa. Simuloinnissa otetaan huomioon sääennusteet. Näin saadaan estimaatti, siitä milloin minkäkin pellon jyvät ovat tarpeeksi tuleentuneet ja kuivimmillaan. Kun konekapasiteetti tiedetään, voidaan optimoida sadonkorjuu siten, että korjattu vilja on tuleentunut ja sen kosteusaste on niin alhainen, kuin kahden viikon aika on ollut mahdollista. Sääennuste otetaan huomioon tietynasteisen worst-case-skenaarion kaltaisena. Esimerkiksi sateet jotka toteutuvat 10% varmuudella, toteutetaan estimaattia simuloimalla. Jos sadeskenaarioon kuulumaton sade yllättää, niin estimaatit päivitetään.

Myös odotusarvomenetelmissä ulostuloarvo on nollan ja yhden välillä. Samoin kuin sumeassa logiikassa alle 0,5 tarkoittaa, että operaatiota ei kannata missään tapauksessa suorittaa, ja arvot nollan ja yhden välillä kertovat operaation kiireellisyydestä.

6.3 Reunaehto operaatioille

Pellolle ei voi mennä traktorilla, jos maan kosteuspitoisuus on liian suuri. Raja kosteuspitoisuudelle riippuu maalaadusta. Maalaadut arvotaan skenaarioille siten, että pellot ovat ominaisuuksiltaan keskimäärin normaalia savimaata. Savimaan kosteuspitoisuusraja esimerkiksi kylvetessä on 94 prosenttia kenttäkapasiteetista, eli kosteuspitoisuudesta jonka maa voi pidättää itseensä (Rotz et al. 2008). Maan kosteuspitoisuus toimii näin reunaehtona kaikille operaatioille.

6.4 Paikkakohtainen päätösmalli

Sen lisäksi, että pitää päättää koska jokin operaatio tehdään, pitää päättää mille alueelle se tehdään. Tämä ratkaistaan jakamalla maatilan pellot pienemmiksi lohkoiksi sen mukaan mikä pellon tilasuure on ominainen millekin operaatiolle. Esimerkiksi rikkatorjunta-alueita päätettäessä pelto jaetaan lohkoihin sen mukaan miten rikkakasvien määrä jakautuu. Näin saadaan aikaan lohkoja, joiden ominaisuudet ovat lähellä toisiaan suoritettavien operaatioiden kannalta katsottuna. Jokaisen lohkon sisällä olevista soluista voidaan siis sanoa, että niillä on suunnilleen yhtä suuri tarve sille operaatiolle, jonka tarvetta tutkiessa lohkominen suoritettiin. Lohkomisessa käytetään flood fill-algoritmia (Shaw 2004).

Pellot jaetaan uusiin lohkoihin aina, kun tietyn operaation tarpeellisuutta tutkitaan. Jokaisen lohkon tarve operaatiolle määritetään edellä mainittujen päätösmallien avulla. Kun jonkin lohkon tarve nousee yli tietyn raja-arvon, tehdään päätös operaation suorittamisesta tällä pellolla. Kun pellolla suoritetaan operaatiota, tehdään se jokaiselle peltolohkolle, jonka tarve ylittää toisen hieman alemman raja-arvon. Esimerkiksi jos lannoitetaan pellon keskellä kipeästi lisälannoitusta tarvitsevaa aluetta, lannoitetaan samalla kaikki lannoitusta tarvitsevat alueet, vaikka ne eivät tarvitsisi lannoitusta niin kipeästi. Toisaalta taas jos pellon missään kohtaa ei ole kovin suurta tarvetta esimerkiksi tautientorjunnalle, niin torjunta jätetään tekemättä.

Kylvössä ja sadonkorjuussa koko pelto operoidaan aina kerralla, eikä lohkomista tehdä. Tämä on yleinen ja hyväksi havaittu tapa peltoviljelyssä, joten sitä käytetään myös tässä projektissa.

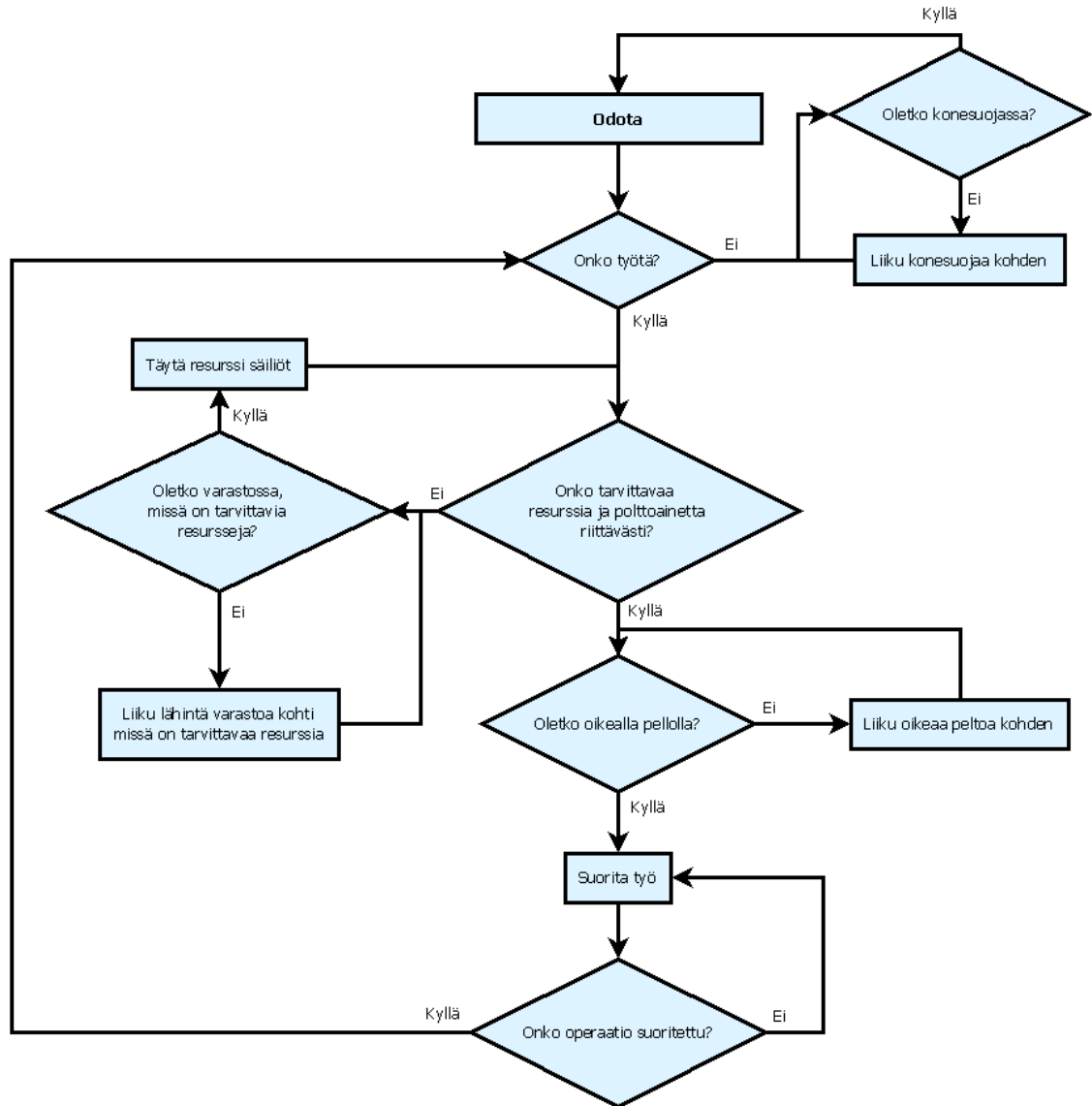
6.5 Logistinen päätösmalli

Kun on päätetty, että tietyllä pellolla tehdään tietty operaatio, pitää vielä päättää mikä kone suorittaa sen ja mistä resurssit otetaan operaation suorittamiseen. Helpoimmassa tapauksessa on vain yksi tehtävä operaatio ja kone sen suorittamiseen on vapaana. Näin ei kuitenkaan aina ole. Tällöin pitää valita operaatioista kaikkein kiireellisin ja odottaa niin kauan, että kone sen suorittamiseen vapautuu.

Operaation kiireellisyys määritellään pellon kiireellisimmän lohkon mukaan. Se määrittelee operaation prioriteetin muiden operaatioiden joukossa. Käytännössä jokaisen pellon jokaisen operaation tarve määritellään erikseen ja laitetaan listaan. Lista järjestetään operaatioiden prioriteetin mukaan ja operaatioita tarjotaan konekannalle prioriteettijärjestyksessä. Konekantaa hallitseva tekoäly tarkastelee annettua operaatiota ja valitsee joukostaan sen vapaan koneen³², jolla on paras kapasiteetti operaation

suorittamiseen, ja lähettää sen tekemään annettua tehtävää.

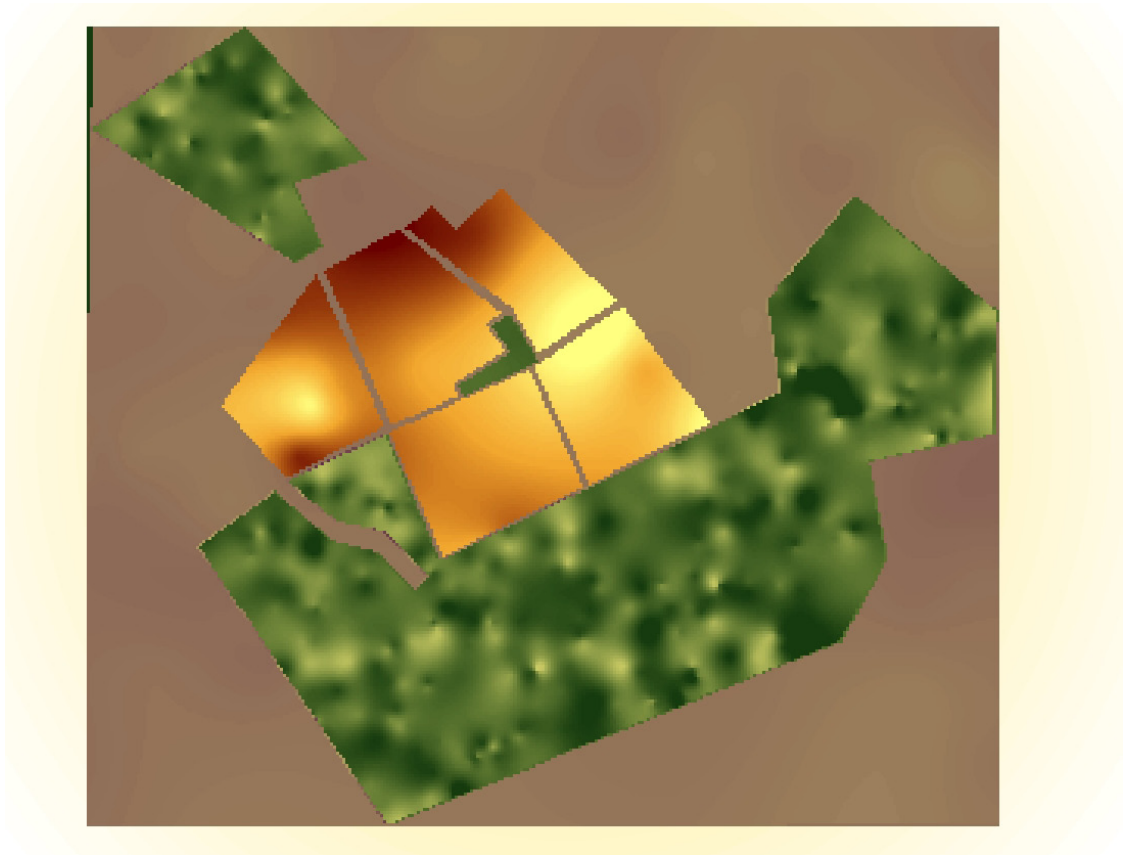
Kun kone on lähetetty suorittamaan tehtävää, sen täytyy ensin hakea tehtävään tarvittavia resursseja. Jos kone on menossa lannoittamaan, sen täytyy hakea lannoitetta tai jos se on menossa torjumaan rikkakasveja, sen täytyy hakea kasvinsuojeluainetta. Jos resursseja haettaessa käydään varastossa, jossa on myös polttoainetta, niin koneen tankki täytetään samalla. Kun koneella on tarvittavat resurssit, se menee käsketylle pellolle suorittamaan kyseistä operaatiota ja työskentelee siellä niin kauan, kunnes resurssit loppuvat, polttoaine alkaa loppua tai operaatio on suoritettu loppuun. Jos operaatio keskeytyy resurssien tai polttoaineen loppumiseen, kone käy hakemassa lisää lähimmästä varastosta, jossa kyseistä resurssia on. Sadonkorjuu eroaa muista operaatiosta, koska sen suorittaminen ei vaadi resursseja, vaan tilaa koneen viljasäiliössä. Sadonkorjuun dynamiikka on kuitenkin täysin sama kuin muiden operaatioiden, sillä viljasäiliön vapaata tilaa voidaan pitää resurssin määränä ja sen tyhjentämistä resurssivaraston täyttämisenä. Kuvassa 9 näkyy havainnollisesti kuinka koneet toimivat. Koneet lähtevät aina Odota-tilasta ja myös päätyvät aina siihen, myös siinä tapauksessa, että annettu aikayksikkö loppuu kesken jotain operaatiota. Tämän tekoälyn dynamiikka toimii siten, että kun keskeytetylle koneelle annetaan uusi aikayksikkö, siirtyy kone Odota-tilasta keskenjääneeseen operaatioon.



Kuva 9: Vuokaavio esittää miten kone toimii. Käytännössä kone palaa aina työskenneltyään odota-tilaan. Näin tapahtuu myös, jos määritetty aikayksikkö loppuu kesken jonkin operaation aikana. Kun operaatio on jäänyt kesken, tekoälyn dynamiikka palauttaa koneen odota-tilasta kesken jääneeseen operaatioon.

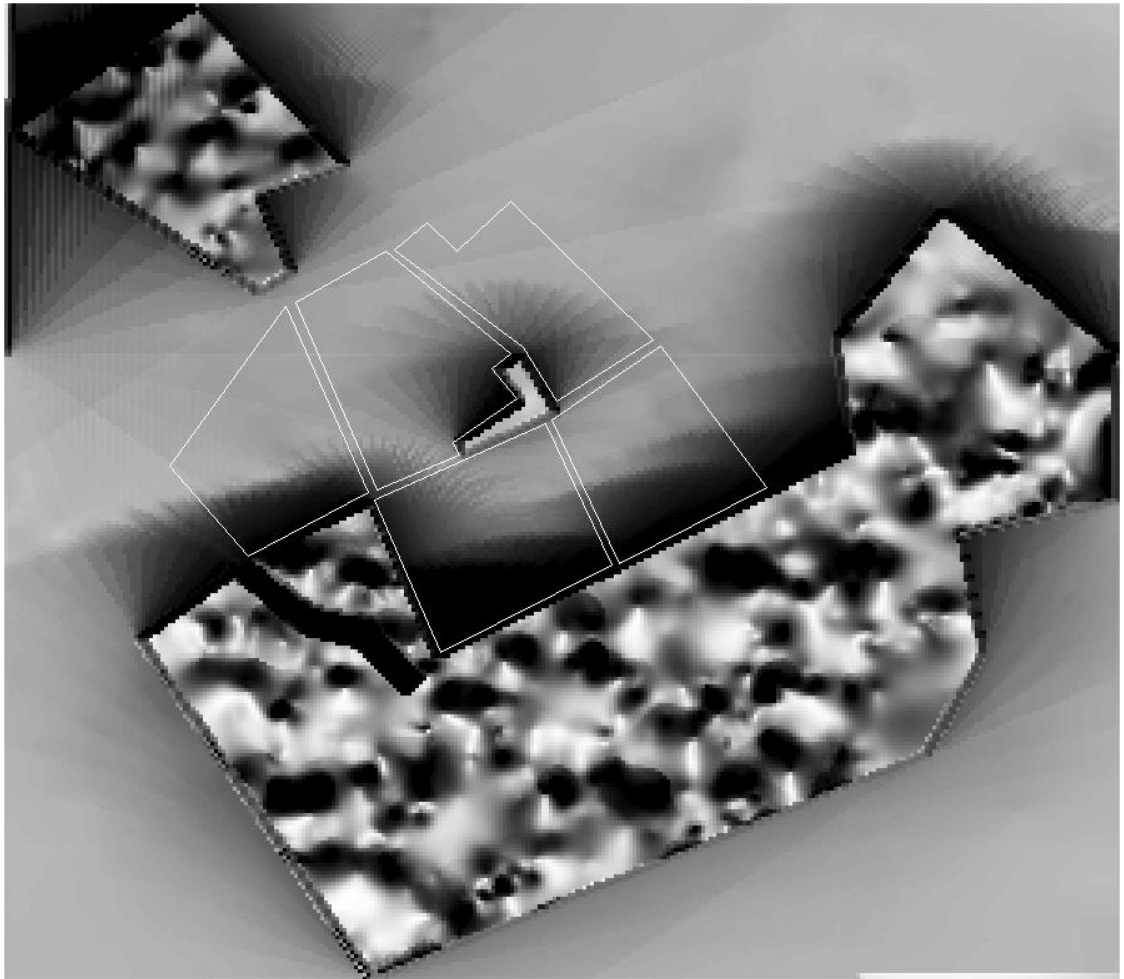
Koneet kulkevat peltojen ja varastojen välillä ArcGIS:ssä määriteltyjä teitä pitkin. Ne valitsevat aina lyhimmän mahdollisen reitin kuljettavakseen tieverkostosta. Lyhimmän reitin hakemiseen käytetään dijkstra-algoritmia (Dijkstra 1959).

keskiarvo on 14,6 kg/ha ja varianssi 4,093 kg/ha, sekä kaliumin 133,1 kg/ha ja 25,963 kg/ha. Keskiarvot on saatu vanhoista peltoalueiden maanäyteanalyysituloksista. Maaperän alkukosteuspitoisuuden keskiarvo on 0,05 ja varianssi 0,005. Tämä on puhdas arvio, joka pohjautuu tietoon, että aikaisin keväällä maa on liian kosteaa muokattavaksi (Varis 1987).



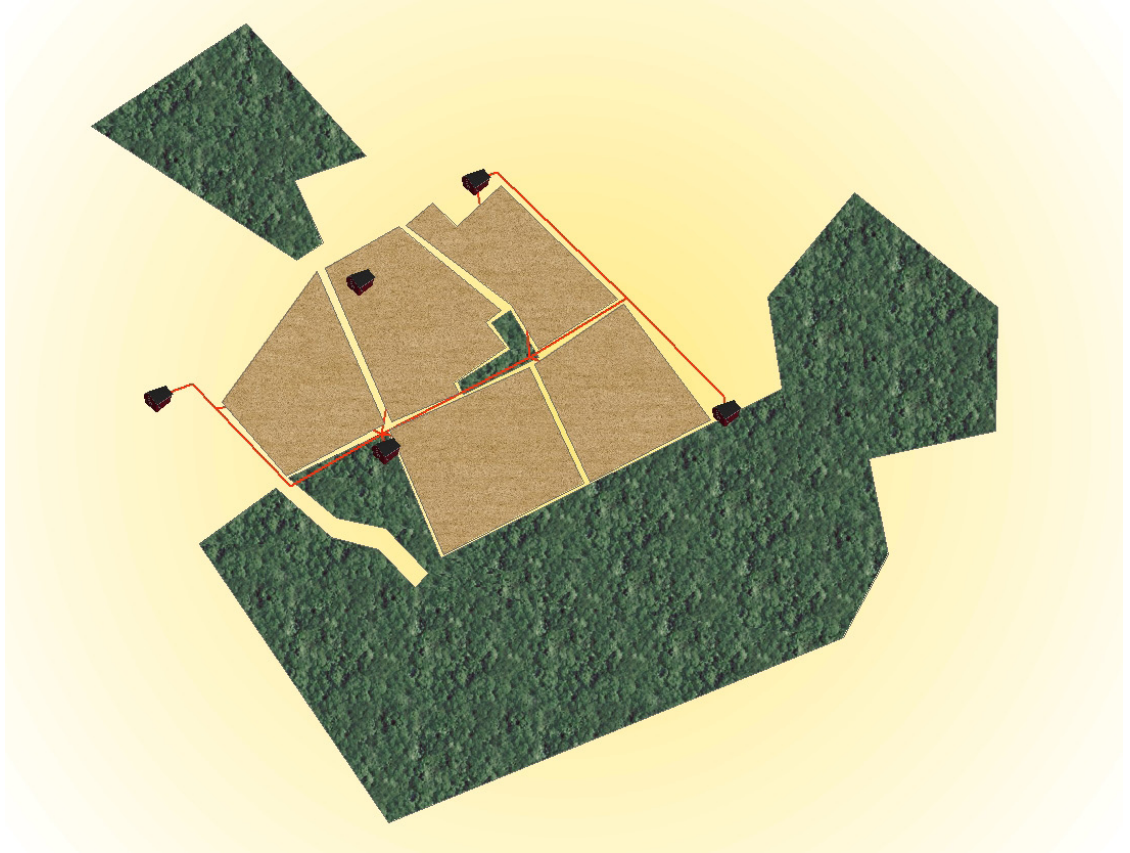
Kuva 11: Edellä olevasta satelliittikuvasta ArcGIS:illä tehty kuva, joka kuvaa pintojen korkeuksia.

Maanominaisuuksien parametrien vaihtelut on talletettu rastereihin samoin kuin pellon ja metsän korkeuserot. Peltojen eri kohtien valoisuudet on laskettu korkeusrastereiden avulla ottaen huomioon peltoja reunustavan metsän varjostava vaikutus, kuten kuvasta 12 näkee.



Kuva 12: Maastoon osuvat auringon valomäärät visualisoituna. Peltojen reunarajat on merkitty valkoisella viivalla.

Tiet on määritelty kulkemaan kartassa näkyvien teiden kohdilta sekä peltojen välistä. Varastot sijoitettiin siten, että peltojen reunoilla on pieniä varastoja, joissa säilytetään joitain määriä resursseja ja hieman kauempana on suurempi varasto, jossa on lähes rajattomasti resursseja ja polttoainetta, sekä paikat koneille. Kuvassa 13 näkyy teiden ja varastojen sijainnit peltojen ja metsien suhteen.

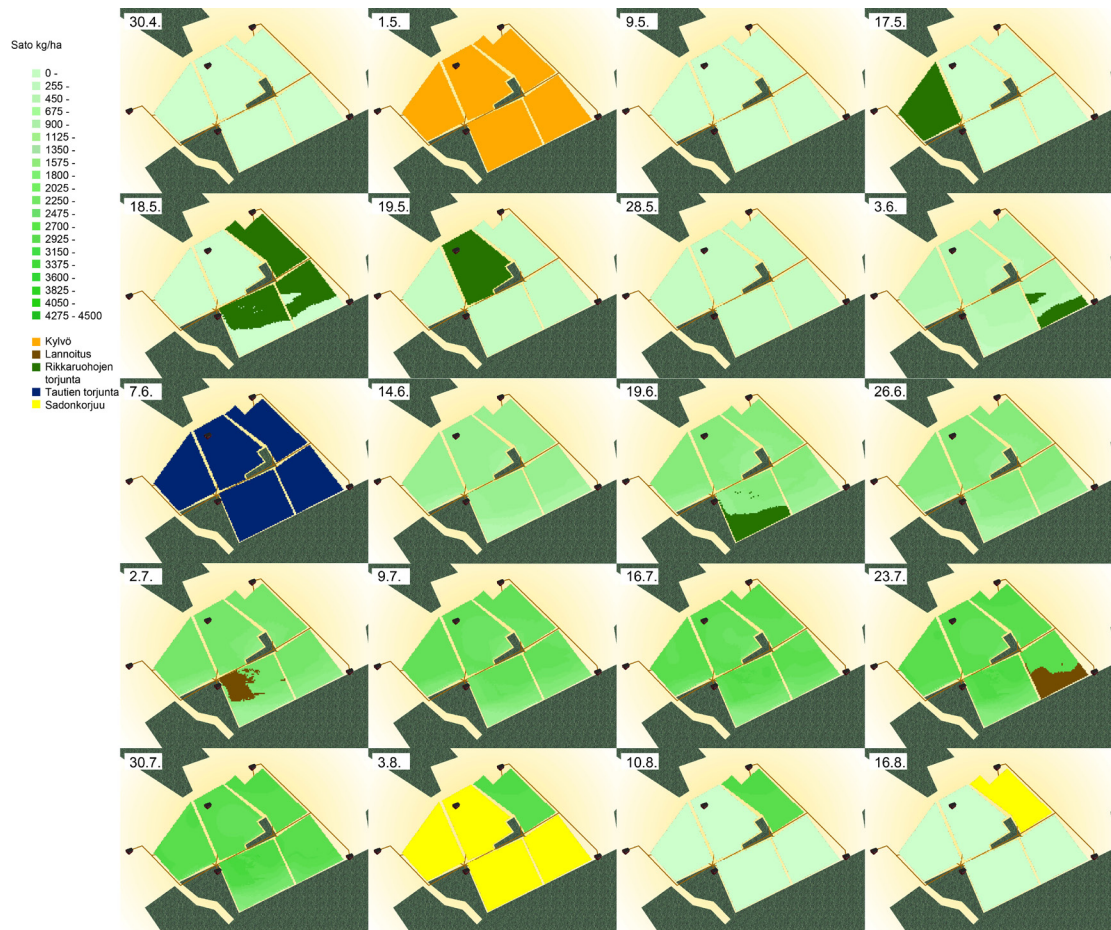


Kuva 13: Simulaatioskenaarion infrastruktuuri. Punainen viiva kuvaa tietä, mökit varastoja, vihreä alue metsää ja rusehtava alue peltoa.

Koneita määritettiin kolme kappaletta. Ne pystyvät suorittamaan kaikkia operaatioita yhtä nopeasti ja ovat muutenkin saman kaltaisia. Peltoa ja sen kasvua simuloitiin sata päivää, mikä vastaa tavallista kasvukauden pituutta Suomessa.

7.2 Simulaatitulokset ja päätöksentekomallien toiminta

Skenaariota simuloitiin Suomen koko kesän kasvukauden yli, mikä tarkoittaa karkeasti ottaen huhtikuun lopusta elokuun puoleen väliin. Työssä havaittiin, että toiminnanohjausjärjestelmä toimii loogisesti. Tämän voi nähdä kuvasta 14.

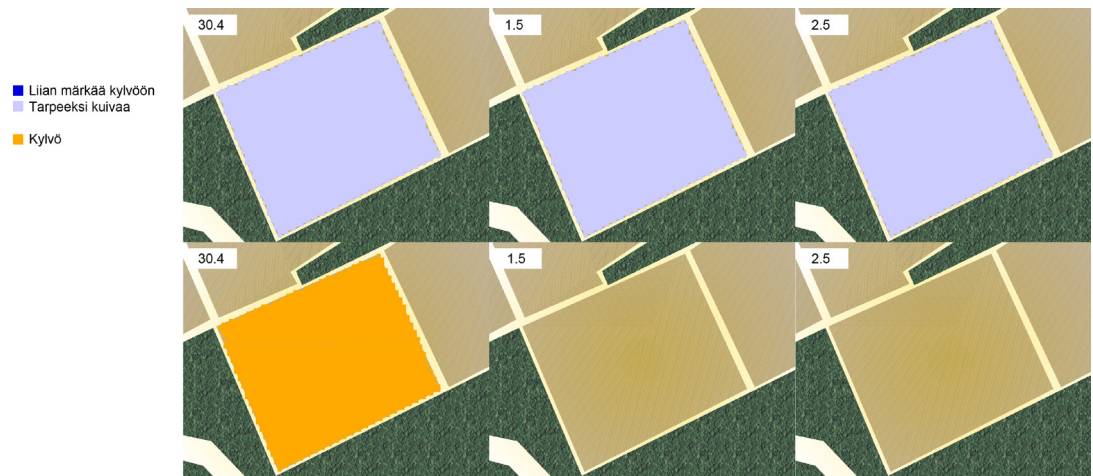


Kuva 14: Peltojen pohjavärinä on sadon määrä. Erilliset operaativärit kertovat missä kohtaa suoritetaan mitään operaatioita.

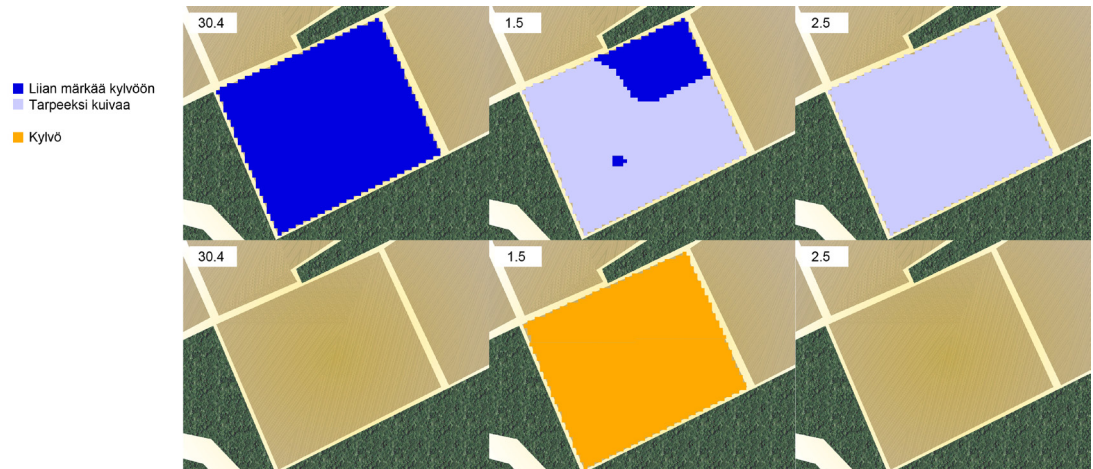
Simulointeja pitää tehdä monia, jotta päätöksentekoaikojen tarkempi toiminta pystytään havainnoimaan tarkemmin. Seuraavat tulokset saatiin simuloimalla maatilaa, joka on muuten samanlainen kuin edellisenkin simulaation maatala, mutta jossa on ainoastaan edellisen skenaarion maatalan alin pelto. Maan ominaisuuksia ja säää muuteltiin siten, että saatiin kattava otos erilaisia tilanteita, joista nähdään selkeästi jokaisen päätöksentekomallin toiminnan.

7.3.1 Kylvö

Kylvön malli on hyvin yksinkertainen, joten se toimii samalla tavalla jokaisessa tapauksessa. Käytännössä maan kosteus laskee niin nopeasti, että pellot ovat lähes heti kylvövalmiita. Esimerkki tällaisesta tapauksessa näkyy kuvassa 15. Siinä kylvö suoritetaan heti aluksi paitsi, jos simuloinnin alkuun ajoittuu rankkasade. Tätä havainnollistaa kuva 16 jossa rankkasade loppuu 30.4.



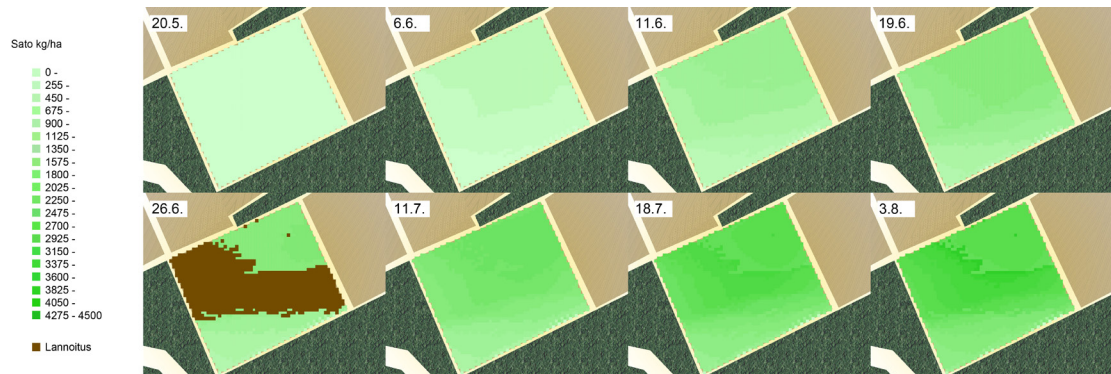
Kuva 15: Kun maaperä on tarpeeksi kuivaa kylvö tapahtuu heti alussa.



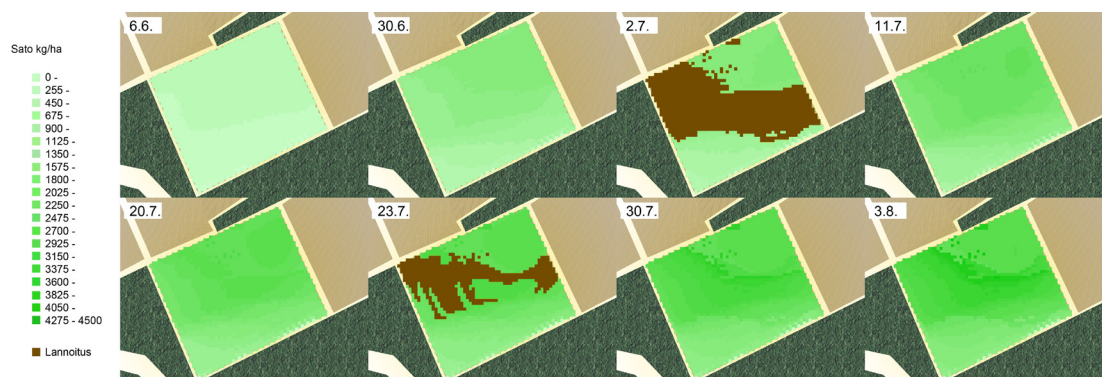
Kuva 16: Jos maaperä ei ole tarpeeksi kuivaa kylvölle, kylvetään vasta kun maaperä on kuivunut tarpeeksi.

7.3.2 Lannoitus

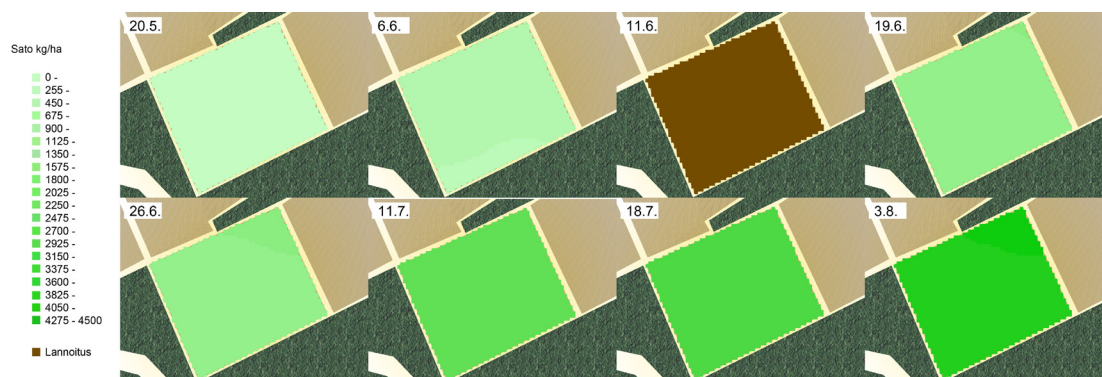
Näissä simuloinneissa lisälannoitetta annetaan tasamäärä kaikkiin lannoitettaviin kohtiin. Lannoitetta annetaan ainoastaan, jos sadon lisäyksestä saatu tuotto kattaa lannoituskustannukset. Lannoituskustannukset ovat sitä suuremmat mitä enemmän lannoitetta annetaan. Tästä johtuen lannoitteen kerta-annosmäärä vaikuttaa siihen kuinka paljon kasvun pitää lisääntyä peltosolussa, jotta se lannoitetaan. Kuvassa 17 ainoastaan pellon keskiosan kasvu lisääntyy tarpeeksi. Kerralla annettava lannoitemäärä on pienempi kuvan 18 tapauksessa. Näin suurempi pinta-ala täyttää lannoittamisehdon, mutta osa pellostä pitää lannoittaa kahdesti. Jos pellon kaikki kohdat saavat paljon auringon valoa, niin koko pelto kasvaa tasaisesti. Tällöin pelto lannoitetaan kokonaan kuten kuvasta 19 näkyy.



Kuva 17: Kun lannoitteen kerta-annosmäärä on suuri, ainoastaan pellon keskiosa kasvaa tarpeeksi nopeasti, jotta se kannattaa lisälannoittaa.



Kuva 18: Kun kerralla annettavaa lannoitemäärää pienennetään, yhä suurempi osa pellosta kannattaa lisälannoittaa, mutta osa pellosta saatetaan lisälannoittaa kahteen kertaan.

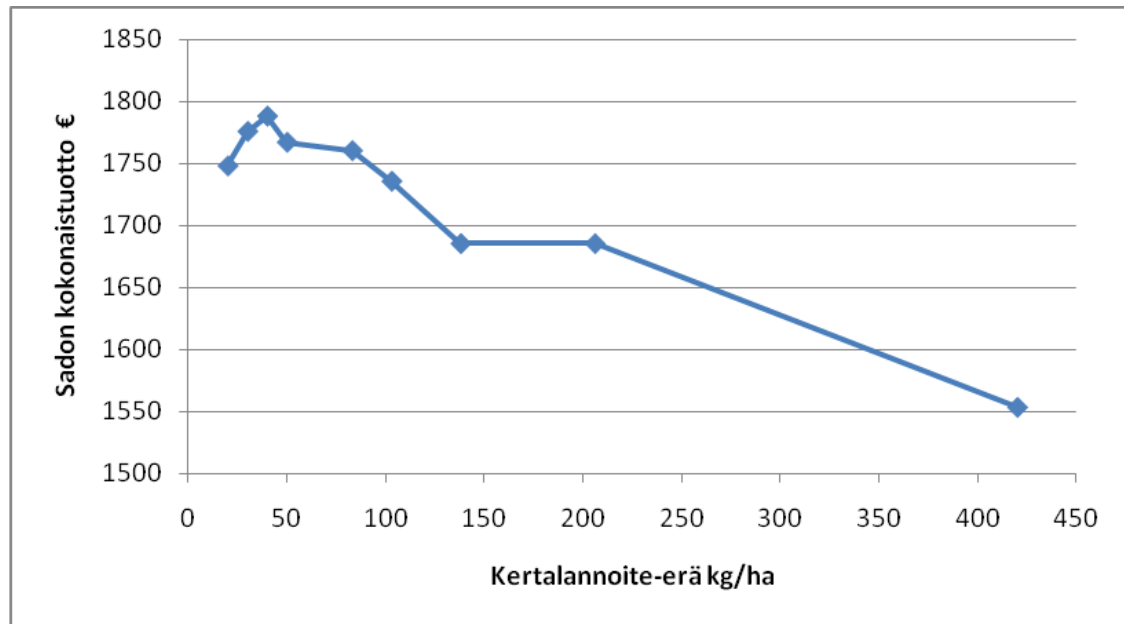


Kuva 19: Jos koko pelto saa yhtä paljon auringon valoa, kaikki kohdat kasvavat nopeasti. Tällaisessa tapauksessa koko pelto lisälannoitetaan kerralla.

Pellon tuotto selvitettiin monella eri kertalannoitemäärällä sekä optimitilanteessa, jossa tiedetään kuinka paljon pellon eri kohdat tarvitsevat minimissään lannoitetta, jotta ne kuitenkin kasvaisivat maksimaalisesti. Tuotot laskettiin optimitilanteelle, jossa koko pelto lannoitetaan optimimäärällä, sekä tilanteelle jossa vain kohdat joiden lannoittamisesta on hyötyä lannoitetaan optimimäärällä. Taulukossa 1 on kertalannoituserät, alue jolle lannoitetta levitettiin, levittämisestä aiheutuneet kustannukset, sadon määrä, sadon arvo ja pellon kokonaistuotto sekä arvojen laskemisessa käytetyt suureet. Kuvasta 20 nähdään kuinka yksittäisen lannoite-erän suuruus vaikuttaa pellosta saatavaan tuottoon.

lannoitteen määrä	levitettävä alue	lannoituskustannukset	sato	sadon arvo	kokonais-tuotto
kg/ha	ha	€	1000kg	€	€
10	7.8725	143.2795	15208.48	1793.08	1649.80
20	6.435	117.117	15820.61	1865.25	1748.13
30	5.19	107.433	15974.71	1883.41	1775.98
40	3.89	90.248	15933.75	1878.58	1788.34
50	3.8125	97.98125	15820.24	1865.20	1767.22
83	3.9975	135.715125	16083.20	1896.21	1760.49
103	3.8125	129.434375	15820.24	1865.20	1735.77
138	3.9025	186.14925	15873.92	1871.53	1685.38
206	2.595	167.8965	15719.14	1853.28	1685.39
420	2.5175	297.5685	15697.40	1850.72	1553.15
osittain optimisti	4.8675	140.6979	17265.08	2035.55	1894.85
koko pelto optimaalisesti	5.2475	145.9259	17266.17	2035.68	1889.75
lannoitteen hinta	konekulut	pellon pinta-ala	viljanhinta	Lannoitteen	N%
250e/tn	13.2e/ha	5.2475 ha	0.1179e/tn	25%	

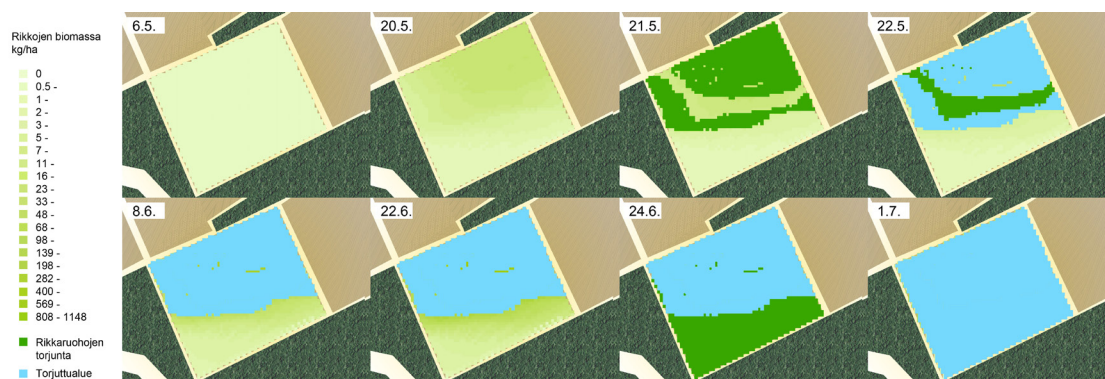
Taulukko 1: Taulukossa on listattuna pellon tuottoon ja kustannuksiin liittyviä suureita kertalannoite-erän koon mukaan listattuna. Koko pelto optimisti tarkoittaa, että koko pellolle annetaan juuri sen verran lannoitetta kuin mikäkin kohta pystyy tehokkaasti hyödyntämään. Osittain optimisti tarkoittaa, että vain niille kohdille annetaan optimilannoitemäärä, joille se on taloudellisesti hyödyllistä.



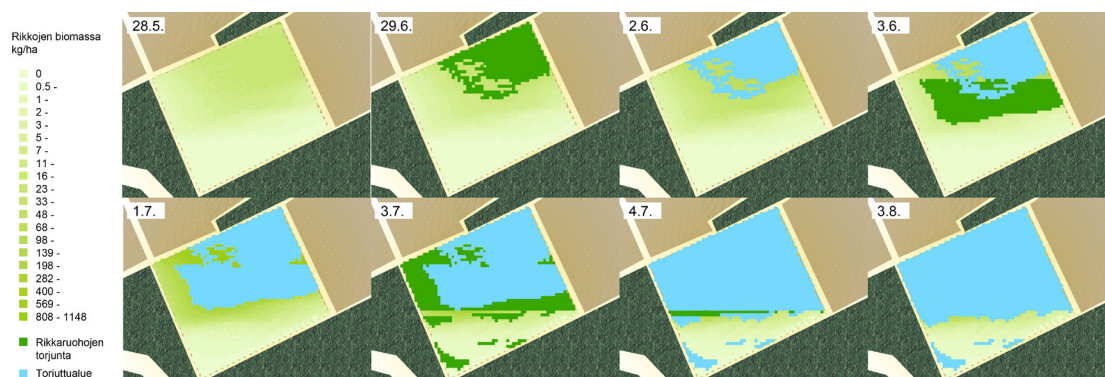
Kuva 20: Kuvassa X-akselilla lannoite-erän koko ja Y-akselilla pellosta saatu tuotto.

7.3.3 Rikka- ja tautitorjunta

Rikka- ja tautitorjunnassa käytetään samanlaista sumean logiikan päätösmallia. Ainoa ero näissä on, että rikkatorjunnassa yhtenä sisääntulona on rikkakasvien määrä ja tautien torjunnassa tautisuus. Sumeutus- ja selkeytysfunktiot sekä logiikkasäännöt ovat täysin samanlaisia. Näin ollen niistä saadut tulokset kertovat samaan aikaan kummastakin päätöksentekomallista. Rikkakasvien ruiskutus tapahtuu normaalisti muutamassa erässä sitä mukaa kuin rikkakasvit lisääntyvät, niin kuin kuvasta 21 on havaittavissa. Kuvasta 22 kuitenkin näkyy, että jos rikkoja on paikoin hyvin vähän, ainoastaan osa alueesta ruiskutetaan. Jos taas rikkakasvien varianssi on pientä, koko alue ruiskutetaan kerralla, kuten kuvassa 23 voi havaita. Tautien torjunta hoidetaan poikkeuksetta yhdessä erässä ja koko pelto kerrallaan, kuten kuvassa 24 näkyy. Tämä johtuu siitä, että tautien määrän vaihtelu on aina, olosuhteista huolimatta, hyvin vähäistä.



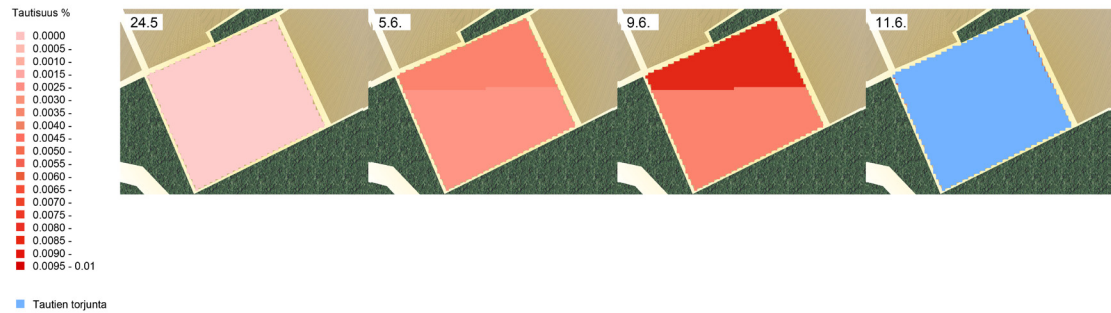
Kuva 21: Rikkoja torjutaan normaalissa tapauksessa sitä mukaa, kuin tarvetta niiden torjuntaan ilmenee. Tässä kuvassa koko pelto ruiskutetaan kolmessa osassa.



Kuva 22: Kaikkia kohtia ei ruiskuteta, jos rikkakasveja on paikoin hyvin vähän.



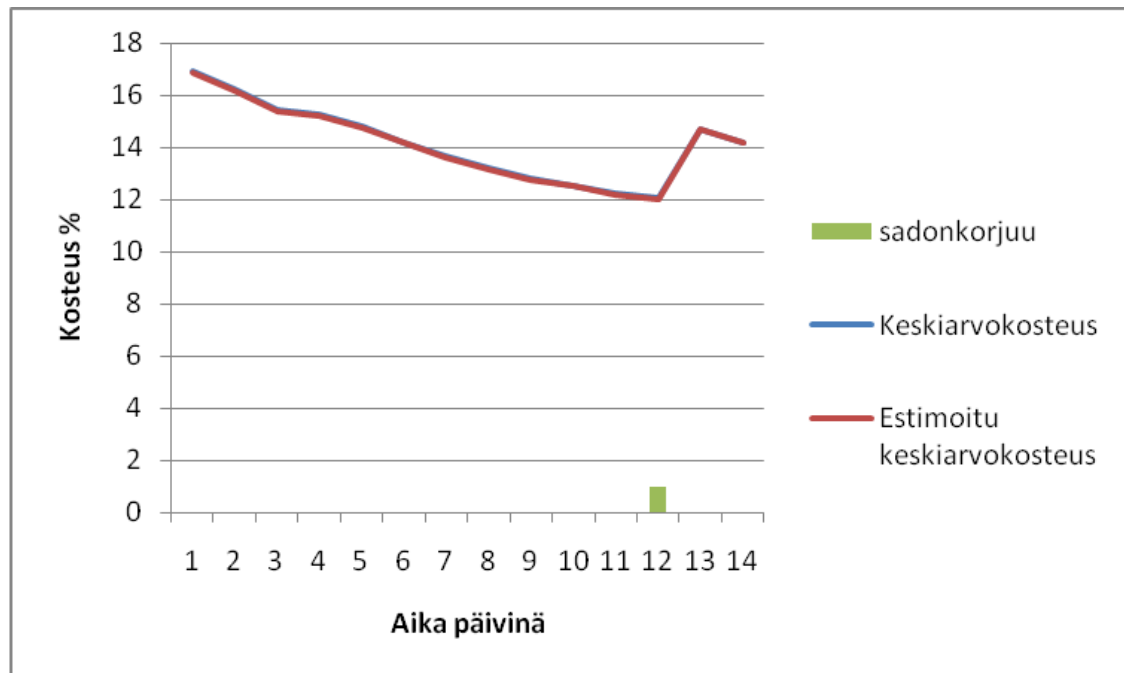
Kuva 23: Jos rikat kasvavat tasaisesti, niin koko pelto ruiskutetaan kerralla.



Kuva 24: Taudit lisääntyvät kaikissa tapauksissa niin tasaisesti, että ne ruiskutetaan aina kerralla koko pellosta.

7.3.4 Sadonkorjuu

Sato korjataan kerralla koko pellosta sen mukaan, miten jyvien kosteuden keskiarvo kehittyy. Siihen ei siis vaikuta pellon tilojen alueellinen vaihtelu millään tavalla. Jyvien keskiarvokosteuden estimaatti seuraa hyvin oikeata keskiarvoa, kuten kuvasta 25 voidaan huomata. Samassa kuvassa näkyy myös, mihin ajankohtaan sadonkorjuu ajoittuu. Sadonkorjuu tapahtuu, kun jyvien keskiarvokostues on pienimmillään eli juuri siihen aikaan kun on optimaalista.



Kuva 25: Pellossa olevien jyvien todellinen keskiarvokosteus ja niiden estimoitu kosteus ovat niin lähellä toisiaan, että niitä kuvaavat käyrät menevät lähes kokonaan päällekkäin. 12. päivänä tapahtuva kosteuden äkillinen nousu johtuu sateesta. Kuvassa on myös merkki milloin sadonkorjuu tapahtuu, eli silloin kuin kosteus on pienimmillään

7.3.5 Logistiikka

Työkoneet siirtyvät paikasta toiseen lyhintä reittiä oikomatta peltojen läpi. Jos työhön tarvittavat resurssit loppuvat, niitä haetaan lähimmästä varastosta. Koneet liikkuvat niin kuin suunnitellun tekoälyn oli tarkoituskin ohjata niitä. Kuvassa 26 on esitetty työkoneiden reitit 18.5 tapahtuvassa kolmen pellon rikkatorjunnassa.



Kuva 26: 18.5 tapahtuva rikkojen torjunta. Työkoneet kulkevat järkeviä reittejä varastojen ja peltojen välillä. Eriväriset nuolet kertovat eri työkoneiden liikkeistä. Koneet liikkuvat samaa reittiä takaisin konesuojaan kuin menivät pelloille, eli vastakkaiseen suuntaan kuin nuolet osoittavat.

8 Johtopäätökset

Päätösmallit toimivat yleisesti ottaen hyvin, kun niitä käytetään ohjaamaan simuloitua peltotilaa. Oikeassa peltotilassa ne toimisivat ainoastaan tyydyttävästi, sillä odotusarvomenetelmät optimoivat simuloidun peltotilan sadon kasvua, joka ei vastaa täysin oikeaa maailmaa. Kaikki kehitetyt päätöksentekomallit pystyttäisiin kuitenkin varmasti kalibroimaan niin, että ne toimisivat hyvin myös oikealla peltotilalla. Myös peltojen lohkominen pienemmiksi operoitaviksi alueiksi toimii hyvin. Algoritmia voitaisiin kehittää siten, että operoitavat alueet olisivat sen muotoisia, että alueiden lävitse ajaminen olisi kustannustehokasta.

Autonomisten viljelyrobottien toiminnanohjausjärjestelmä on hyvinkin mahdollista toteuttaa. Tulevaisuuden peltotilan robotit pystyvätkin viljelemään peltoja tehokkaammin ja ympäristöystävällisemmin kuin nykyaikaisilla menetelmillä on mahdollista.

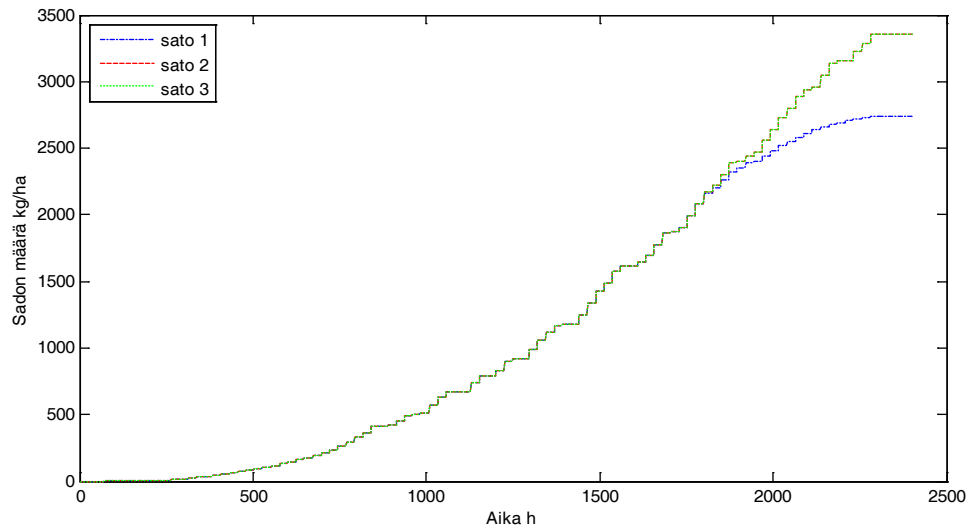
8.1 Sumeaan logiikkaan pohjautuvat menetelmät

Sumeaan logiikkaan pohjautuvat rikkojen ja tautien torjuntamallit toimivat erittäin hyvin. Niiden kehittäminen oli nopeaa ja niiden dynaaminen luonne tarjoaa laajat jatkokehitysmahdollisuudet. Sumealla logiikalla toimivat päätöksentekomallit eivät myöskään vaadi suurta laskentatehoa. Se on tärkeää, sillä pellon kasvusimulaatiot vievät paljon aikaa ilman päätöksentekomallejakin.

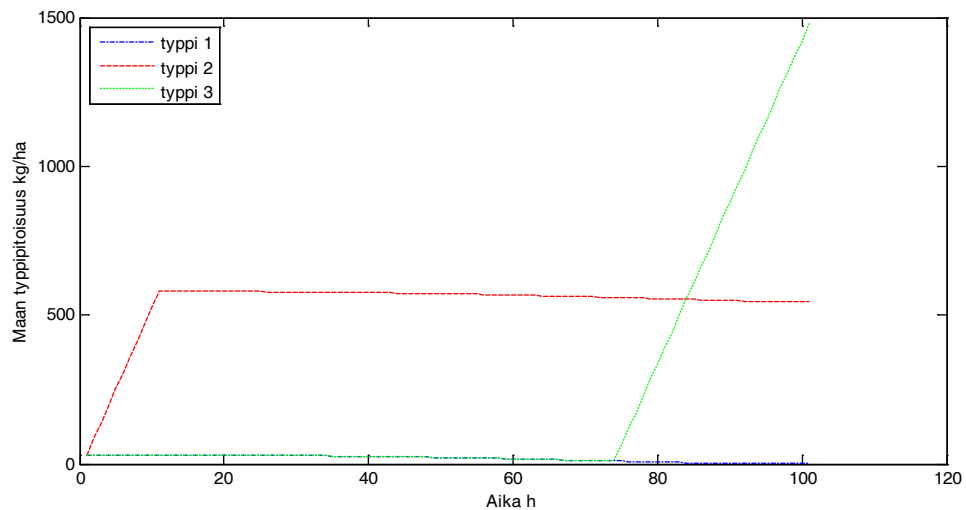
8.2 Odotusarvoon pohjautuvat menetelmät

Sekä sadonkorjuussa että lisälannoittamisessa odotusarvot saadaan luomalla peltosolu, jonka ominaisuudet ovat samat kuin koko peltolohkolla keskimäärin ja simuloimalla sitä eteenpäin. Näissä tapauksissa tämän yhden solun arvo seuraa hyvin koko pellon keskiarvon kehitystä. Jos tarkkailtavan suureen dynamiikka on hyvin epälineaarinen, joukon arvojen estimointi keskiarvoyksiköllä saattaa antaa huonoja tuloksia. Esimerkiksi jos puolet pellon solujen jyivistä ovat hyvin kuivia (kosteuspitoisuus 10%) ja puolet vettyneitä (kosteuspitoisuus 30%), niin keskiarvosolun jyvät ovat täysin märän ja täysin kuivan puolella välissä (kosteuspitoisuus 20%). Jos jyvien vedenimukyky on verrannollinen jyvän kosteuden neliöön siten, että mitä kuivempi jyvä on, sitä paremmin se imee sadevettä itseensä, niin sade joka kastelee kuivan jyvän kosteuteen 20% kastelee keskiarvojyvän kosteuteen 22.5%. Sateen jälkeen koko pellon jyvien keskiarvokosteus olisi 25% mikä on suurempi kuin keskiarvosolun jyvänkosteus. Epälineaarisuutta pystyisi korjaamaan siten, ettei valittaisi koko pellon keskimääräisiä ominaisuuksia, vaan painotettaisi jokaista ominaisuutta sille hyvällä kertoimella. Tämä ei kuitenkaan toimi, kun arvoa estimoidaan eteenpäin määräämätömän verran päiviä.

Lisälannoittamista säätelevä päätöksentekomalli toimii tyydyttävästi. Malli optimoi käytettävää kasvinsimulointimallia, joten se on yhtä hyvä kuin kasvimallikin. Tästä seuraa muutamia epäloogisuuksia. Normaalissa peltoviljelyssä pellolle kannattaa antaa lannoite niin aikaisessa vaiheessa kuin mahdollista, sillä maan korkea ravinnepitoisuus auttaa kasvin kasvua heti alusta lähtien. Kasvisimulaattorissa ravinteiden määrä vaikuttaa kasvuun ainoastaan, jos typen määrä putoaa tietyn rajan alapuolelle. Tämä tapahtuu vasta kahden kuukauden kuluttua kylvöstä, jos typen määrä on alussa realistinen, niin kuin kuvista 27 ja 28 näkyy.



Kuva 27: Kuvassa kolmen eri peltosolun sadon kehitys. Solut ovat muuten identtiset, mutta niitä lannoitetaan eri tavoilla. Sato 1 ei saa ollenkaan lisälannoitusta, sadolle 2 annetaan alusta asti hyvin paljon lannoitetta ja sato 3 rupeaa saamaan lannoitetta vasta parin kuukauden päästä kylvöstä. Sato 2 ja 3 ovat identtiset joten kuvaajat ovat päällekkäin. Kuvassa 28 on jokaisen näiden solun typen määrä maassa ajan funktiona.



Kuva 28: Kuvassa kolmen eri peltosolun maaperässä olevan typen määrä ajan suhteen. Yhtä solua lannoitetaan alusta alkaen, toista ei ollenkaan ja kolmatta vasta kahden kuukauden päästä kylvöstä. Jokainen typenmäärä vastaa kuvassa 27 kuvattua satokehitystä.

Peltosolujen simulointi on hyvin hidasta. Koska tässä päätöksentekomallissa pitää simuloida kahta peltosolua kasvukauden loppuun saakka, päätöksentekomallin käyttäminen on hidasta.

Lannoituksessa päästään parhaaseen tulokseen, jos paikkakohtainen ravinnetarve tiedetään etukäteen ja jokaiselle pellon pisteelle annetaan juuri sen tarvitsema lannoitemäärä. Jos tarvittavia määriä ei tiedetä ja lannoitus hoidetaan kertaluontoisilla tasasuuruksilla lisälannoite-erillä, niin parhaaseen tulokseen päästään jos lisälannoite-erät ovat pieniä. Parhaaseen tuottoon päästiin simulaatiossa kun kerralla annettava määrä oli 40kg/ha 25 prosenttista typpilannoitetta. Tämä oli yllättävää sillä tavallisessa peltoviljelyssä käytettävät lisälannoite-erät ovat moninkertaisia (Seppänen 2008).

Sadonkorjuun päätöksentekomalli toimii yllättävän hyvin, sillä estimoitu kosteus seuraa hyvin pellon keskiarvokosteutta. Kun kosteusmäärät ovat tiedossa, on yksinkertaista valita sadonkorjuun ja puinnin ajankohdaksi ne päivät, jolloin jyvien keskimääräinen kosteus on alimmillaan. Tämä voisi toimia hyvin myös oikean peltotilan ohjauksessa, sillä korjaus tapahtuu aina ennen sadetta jolloin jyvän kosteudessa on luonnollisesti aina lokaali minimi. Toisaalta malli ei ota huomioon aamukasteen vaikutusta, joka saattaa joissain tapauksissa olla hyvinkin suuri. Myös sakoluvun ja jyvän tuleentumisasteen optimoiminen pitäisi kalibroida viljeltävän kasvin mukaan. Tämä on kuitenkin mahdollista päätösmallin puitteissa.

Suurimpana haasteena oikean peltotilan ohjausta varten on riittävien ja riittävän usein tehtävien mittausten saaminen, jotta kasvin ja maaperän tila on selvillä päätöksentekoa varten. Esimerkiksi sadonkorjuun tapauksessa jyvien kosteuden mittaus pitäisi automatisoida, jotta päätöksenteon voisi automatisoida.

8.3 Logistisetkomponentit

Työkoneiden ajoreitit ovat järkeviä, ja ne hoitavat peltoja siten, että pelloissa tehdään päätöksentekomallien antamat operaatiot. Operaatiot tehdään oikeisiin aikoihin konekapasiteetin riittäessä. Ajoreittejä ja koneiden käytön priorisointia voisi kuitenkin optimoida vielä paljon. Esimerkiksi, jos montaa peltoa pitää operoida samana päivänä niin usein lähetetään yksi kone jokaiselle pellolle, vaikka yksikin kone saattaisi ehtiä operoimaan kaikki pellot yhden päivän aikana.

9 Yhteenveto

Peltoviljelyn automatisointia on tutkittu paljon. Varsinaista läpimurtoa ei ole vielä kuitenkaan tapahtunut lukuisista edistysaskelista huolimatta. Pellon ominaisuuksia on jo mahdollista mitata paikkakohtaisesti nykytekniikalla.

Diplomityön tutkimusaiheena oli erilaisten päätöksentekomallien soveltaminen peltoviljelyn operaatioihin, sisältäen pistemäisen ja alueellisen päätöksentekomallin. Pistemäinen päätöksentekomalli kertoo tarvitseeko homogeeniselle pellon osalle tehdä jokin operaatio, jos se on tietyssä tilassa ja sillä on tietynlaiset parametrit. Alueellinen päätöksentekomalli puolestaan kertoo, koska pellolle kannattaa mennä operoimaan, jos osa pellostä tarvitsee operointia ja osa ei. Malli kertoo myös minkälainen alue operoidaan, jos pellolle päätetään mennä operoimaan.

Työssä pyrittiin toteuttamaan päätöksentekomallien osalta täydellinen maatalan toiminnanohjausjärjestelmä, joka kertoo milloin millekin pellolle pitää tehdä mikäkin operaatio ja mitkä osat pelloista tulee operoida. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta lisätä malliin komponentit, jotka mahdollistavat logistiikan tutkimisen.

Operaatioiden määrä oli rajattu viiteen hoidolliseen operaatioon: kylvöön (jonka yhteydessä tehdään maan muokkaus ja alkulannoitus), lisälannoitukseen, rikkaruohojen torjumiseen, tautien torjumiseen ja sadonkorjuuseen. Peltokoneiden oletettiin sisältävän tarvittava äly pellolla, teillä ja varastojen läheisyydessä liikkumiseen. Näin ohjausjärjestelmä toimii maataloilla, joilla traktoreita ohjaavat ihmiset, maataloilla joilla niitä ohjaavat koneet ja maataloilla joilla niitä ohjaavat kummatkin. Toteutettava päätöksentekomalli keskittyi, siihen mitkä peltojen alueet tarvitsevat hoitoa, mistä

varastosta haetaan mitäkin resurssia ja mitä reittiä näiden välillä kuljetaan. Varsinaisiin ajolinjoihin ja muuhun alemman tason toimintaan ei siis otettu kantaa. Tutkimuksen avuksi toteutettiin simulaattori, jolla voitiin simuloida erilaisten maatilojen peltojen kehitystä. Simulaattori sisälsi kasvimallin, joka oli toteutettu Agroteknologian laitoksella.

Diplomityössä tutkittiin kahden eri tyyppisen päätöksentekomallin toimintaa. Nämä olivat sumea logiikka ja odotusarvoihin pohjautuva menetelmä. Odotusarvomenetelmää käytettiin lisälannoittamisessa ja sadonkorjuussa tehtäviin päätöksiin. Odotusarvot otettiin estimaatteina peltosimulaattorista. Sumeat logiikat kehitettiin Agroteknologian laitoksen kanssa yhteistyössä. Niitä käytettiin rikkojen- ja tautien torjunnassa tehtävissä päätöksissä. Kumpikin päätöksentekomalli soveltui peltoviljelynohjausjärjestelmään ja niiden avulla pystyttiin määrittelemään mille alueille operaatioita pitää milloinkin tehdä.

Toiminnanohjausjärjestelmä suoritti operaatioita loogisiin aikoihin ja loogisessa järjestyksessä ja loogisissa peltolohkoissa. Poikkeuksena oli lisälannoituksen ajoitus. Normaalissa peltoviljelyssä pellot lannoitetaan niin aikaisin kuin mahdollista. Toiminnanohjausjärjestelmä lannoitti vasta kahden kuukauden kuluttua kylvöstä tai jopa myöhemmin. Tämä johtui kuitenkin kasvisimulaattorin toiminnasta.

Toiminnanohjausjärjestelmä toimi hyvin sen ohjatesa simuloitua maatilaa. Kuitenkin jotkin yksityiskohdat vihjasivat, että jos järjestelmää käytetään ohjaamaan oikeaa peltoviljelyä, niin se pitäisi vähintäänkin kalibroida uudelleen. Simulaattorista saadut odotusarvoina käytetyt estimaatit seurasivat yllättävän hyvin simulaattorin pellon arvoja, vaikka ne perustuivat pellon keskiarvosolun tilanmuutoksiin. Tästä johtuen

varsinkin sadonkorjuu toimi yllättävän hyvin. Lisälannoituksen päätöksentekomalli toimi eri tavalla kuin oikeassa pellonhoidossa toimitaan. Oikea vilja kasvaa alusta asti sitä nopeammin ja isommaksi, mitä enemmän sillä on ravinteita. Simulaattorin kasvimallin kasvien kasvu hidastui vasta kun typen määrä maassa väheni alle arvon 10 kg/ha. Tästä johtuen päätöksentekomalli optimoi lisälannoituksen siten, että lannoitus tapahtui vasta vähän ennen typen määrä meni alle raja-arvon. Kasvukauden alussa maassa on keskimäärin typpeä 30kg/ha. Typen määrä menee alle kymmenen vasta kahden kuukauden kuluttua kylvöstä. Oikeassa peltoviljelyssä tämä olisi aivan liian myöhäinen ajankohta lannoittamiselle. Toinen epätavallinen tulos lisälannoituksessa oli lannoite-erän suuruudessa. Kun peltoa lannoitettiin siten, että lisälannoitetta tarvitseville alueille annettiin aina samansuuruinen määrä lannoitetta, optimi lisälannoite-eräkoko oli 40kg/ha. Normaalissa peltoviljelyssä lisälannoite-erät ovat hyvin paljon isompia (Seppänen 2008). Sumeiden säätimien toteuttaminen oli erittäin nopeaa ja verrattain vaivatonta. Ne toimivat hyvin nopeasti verrattuna odotusarvojen laskemiseen ja niiden jatkokehitysmahdollisuudet ovat laajat.

Päätöksentekomallit toimivat hyvin kaikilla tasoilla. Samoja malleja on myös mahdollista käyttää oikeassa peltoviljelyssä ohjaamaan oikeita koneita. Autonomisten viljelyrobottien toiminnanohjausjärjestelmä on siis hyvinkin mahdollista toteuttaa. Tulevaisuudessa saatammekin nähdä automaattisten robottien viljelevän viljaa tehokkaammin ja ympäristöystävällisemmin, kuin mihin ihminen pystyy.

Lähteet

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Depaeke, P., Gaudill re, J.P., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS, European Journal of Agronomy,. Vol 18:3-4. S. 309-332.

Cooke, G. W. 1972. Fertilizing for maximum yield. London. 296 p.

Dijkstra, E. W. 1959. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1: 269–271. Saatavissa: <http://www-m3.ma.tum.de/twiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf>

Eckersten, H., Torssell, B., Korhner, A., Nyman, P., 2004. Modelling radiation use and regrowth in grass and red clover swards: Method of calibration. Ecology and Crop Production Science,. Report 5. Swedish University of Agricultural Science. 50s.

Eckersten, H., Noronha-Sannervik, A., Torssell, B., Nyman, P. 2006. Modelling radiation use, water and nitrogen in willow forest. Crop Production Ecology,. Report 2. Swedish University of Agricultural Science. 32 s. ISSN 1653-5375.

Eriksson, I.S., Elmquist, H., Nybrant, T. 2005. SALSA: A Simulation Tool to Assess Ecological Sustainability of Agricultural Production. Ambio. Vol. 34: 4-5. S. 388-392.

Evira, Elintarviketurvallisuusvirasto. 2009. Kasvintuotanto ja rehut -> Vilja -> Viljasadon laatu -> Laatutekij t -> Sakoluku. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.12 2009]. Saatavissa: http://www.evira.fi/portal/fi/kasvintuotanto_ja_rehut/vilja/viljasadon_laatu/laatutekijat/

sakoluku/.

Glarner H. 2009. Length of Day and Twilight. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.2 2010].

Saatavissa: http://herbert.gandraxa.com/length_of_day.aspx

Google. 2009. Karttatiedot Geocentre Consulting, Tele Atlas [verkkokarttapalvelu]

[viitattu 23.2 2010] Saatavissa: <http://maps.google.fi>

Hardaker, J. B. 2004. Coping with risk in agriculture. Wallingford, Oxfordshire : CABI Pub ; cop. ISBN 0851998313.

Hill, J.M., 2006. dynamic modeling of tree growth and energy use in a nursery greenhouse using Matlab and Simulink [verkkojulkaisu]. Masters of Engineering thesis, Agricultural and Biological Engineering, Cornell University, [viitattu 2.5.2010] Saatavissa: <http://ecommons.library.cornell.edu/handle/1813/3437>

Hyytiäinen, T. Hiltunen, S. 1999. Kasvintuotanto 1. Helsinki : Kirjayhtymä

Isomursu, Pekka. 1993. Sumean logiikan mahdollisuudet. Helsinki : Teknologian kehittämiskeskus. ISBN 951-47-1930-1

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy. Vol. 18:3-4. S. 235-265.

Karvonen, T. & Varis, E., 1992. Mathematical models in crop production. University of Helsinki, Department of plant production, Crop husbandry publication n:r 32. Helsinki University printing house. ISSN 951-45-6150-3. ISSN 0235-3663.

Kilpeläinen T. 2006. Kesäsateiden ilmastolliset piirteet Helsingin Kaisaniemessä 1951–2000. Pro gradu. Fysikaalisten tieteiden laitos. Matemaattis-luonnontieteellinen. Helsinki. 75 s.

Larsbo, M ja Jarvis, N., 2003. Macro 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. A technical description. Emergo. Vol.6. ISSN 1651-7210.

Malczewski, Jacek. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. New York, NY : John Wiley & Sons. ISBN 0-471-32944-4

Oksanen, T. 2007. Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Automaatio- ja systeemitekniikan osasto. Espoo. ISBN 978-951-22-9079-6

Palva R. 2009. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS-tutkimuksen tiedote. [verkkojulkaisu]. TTS tutk.tiedote, Luonnonvara-ala:maatal. Vol. 612. [Viitattu 3.2 2010]. Saatavissa: <http://www.ttskauppa.fi/~UO3zx0000001/?Y999=PIF&Y104=mati612>. ISBN 1797-1624

Pessala, B. 1983. Sään vaikutus herbisidien tehoon. Kasvinsuojeluseuran 18. Rikkakasvipäivä. P. B25-B26

Pietola, Kyösti. 2009. Viljatuotannon markkinariskit. Kalajoki. Kansallinen viljamarkkinaseminaari, MTT.

Rotz, A.C., Corson M.S., Chianese D.S., Coiner C.U., 2008. The integrated farm system model, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Pasture Systems and Watershed Management Research Unit.

- Saarela, I. 1983. Lannoitteet ja runsasravinteiset maat. Koetoim. Ja Käyt. 40: 49.
- Salonen J. 1993. Performance of reduced herbicide doses in spring cereals. Agric. Sci. Finl. 2:537-550.
- San Soucie, C.A., 1996. Mixed Finite Element Methods for Variably Saturated Subsurface Flow. Doctorate thesis, Rice University, Houston, Texas, USA.
- Seppänen Mervi, 2008. Peltokasvien tuotanto, Helsinki. Opetushallitus. ISBN 978-952-13-3479-5
- Shaw J.R. 2004. QuickFill: An efficient flood fill algorithm. The Code Project. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.2 2010]. Saatavissa: <http://www.codeproject.com/>.
- Sørensen, Claus Grøn. 1999, A Bayesian Network Based Decision Support System for the Management of Field Operations, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Denmark, 192 s
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R. CropSyst, 2003. a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy. Vol. 18:3-4. S. 289-307.
- Tattelman, P. ja Knight, R. W., 1988. Analyses of 1-min Rain Rates Extracted from Weighing Raingage Recordings. Journal of Applied Meteorology. Vol. 27. s. 928-938.
- Tigoteam oy. 2009. Tuotehinnasto syksy-kevät 2009 - 2010. [Verkkosivu]. [viitattu 3.2 2010]. Saatavissa: <http://www.tigoteam.com/taysravinne.html>
- De Toro, A. Hansson, P.-A. 2003. Machinery Co-operatives-a Case Study in Sweden. Uppsala, Sweden.

De Toro, A. 2005. Influences on Timeliness Costs and their Variability on Arable Farms. Uppsala, Sweden

Törmä P. 2009. Käytännön Maamies. 13/2009. Helsinki. Yhtyneet Kuvalehdet OY. 6.11.2009

Varis, E. 1987. Peltokasvien tuotannon perusteet. Helsinki. Helsingin kasvinviljelytieteiden laitos. ISBN 951-45-4540-0

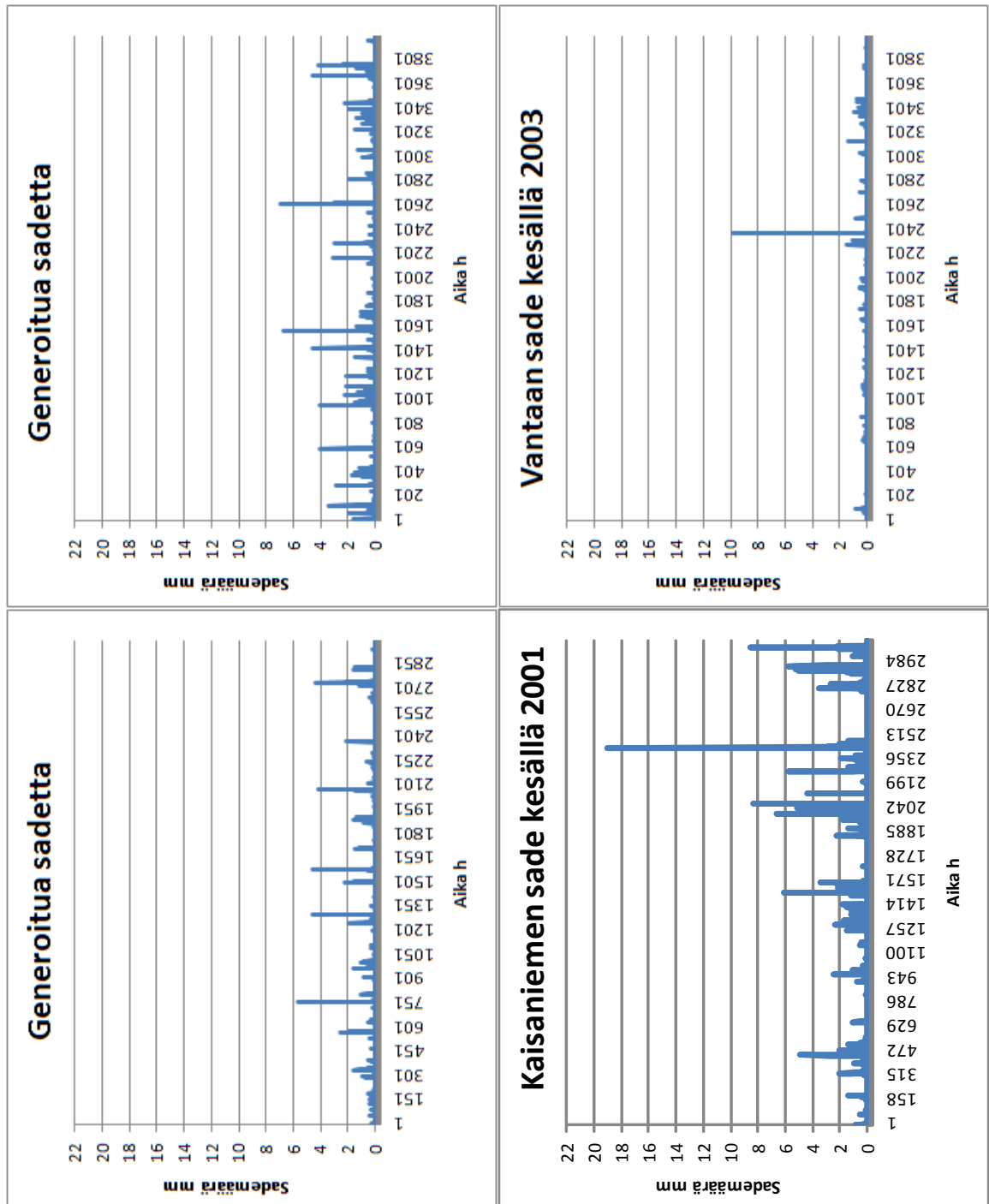
Wang, E., Robertson, M.J., Hammer, G.L., Carberry, P.S, Holzworth, D., Meinke, H., Chapman, S.C., Hargreaves, J.N.G., Huth, N.I., McLean, G. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. European journal of Agronomy. Vol. 18 : 1-1. S. 121-140.

Yara. 2009. Lannoitteet suomalaisiin oloihin, Ravinteiden merkitys. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.2 2010]. Saatavissa: http://www.yara.fi/fertilizer/fertilizer_facts/crop_nutrition/index.aspx

Yin, X., van Laar, H.H. 2005. Crop System Dynamics. An ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions. The Neatherland: Wageningen Academic Publishers, 155s. ISBN 9076998558.

Liite 1: Generoitua ja oikeaa sadedataa vertailtuna

Silmämääräisesti oikea ja generoitu sade vastaavat hyvin toisiaan. Ainoa puute on, että pidemmät sadekaudet puuttuvat. Generoitu sää on suunnilleen keskiarvo Kaisaniemen ja Vantaan säästä koko ajanjakson ajalta, mikä onkin täysin loogista.



Liite 2: Lämpötilan generointi

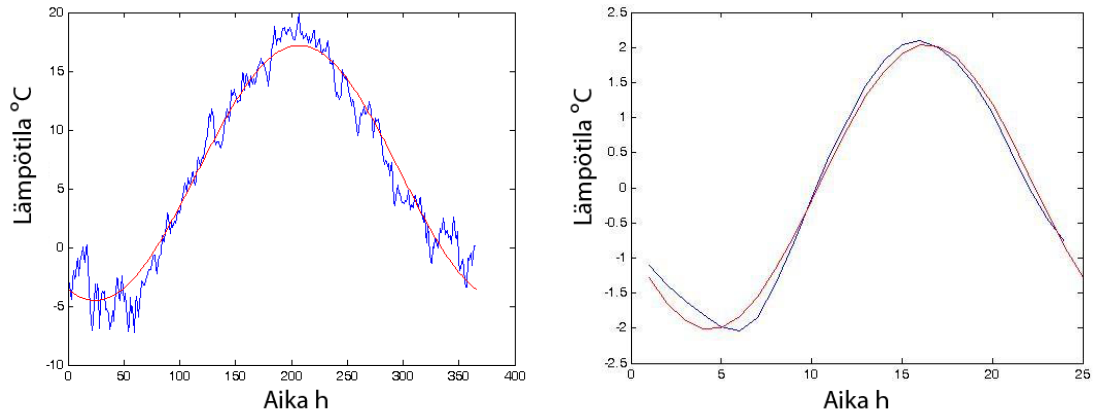
Vuoden lämpövaihtelut noudattavat keskimäärin kaavaa :

$$-10.84595 * \sin\left(\frac{x * 2 * \pi}{365} + 1.1693\right) + 6.3433$$

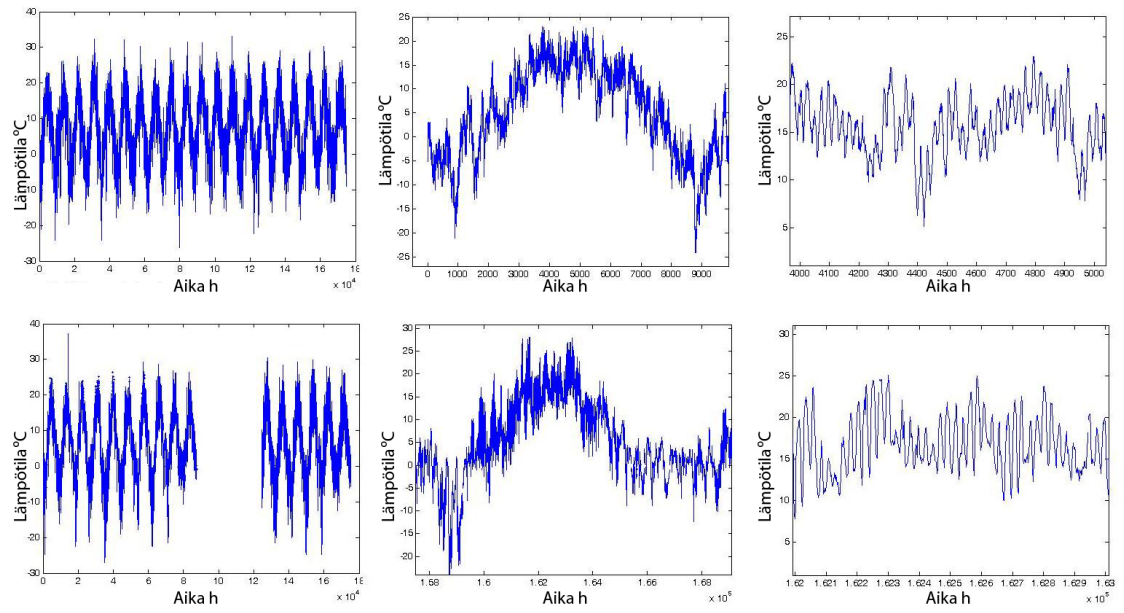
Päivän lämpövaihtelut noudattavat keskimäärin kaavaa:

$$2.0314 * \sin(x * 2 * \pi + 3.8321) + 0.0110$$

Dataan sovitetut käyrät kuvassa I. Kuvassa II on vertailtuna generoitua lämpötilaa ja oikeaa lämpötilaa.



Kuva I: Vasemmassa kuvassa vuoden keskiarvolämpötilat ja niihin sovitettu sin-funktio. Oikealla päivän keskiarvolämpötilat ja niihin sovitettu sin-käyrä.



Kuva II: Yläkuvissa on säägeneraattorilla generoitua ja alakuvissa oikeaa lämpötiladataa

Liite 3: Päivän pituuden laskeminen

Muokattu artikkelista: Glarner H. 2009. Length of Day and Twilight. [verkkojulkaisu]. [viitattu 23.2 2010]. Saatavissa: http://herbert.gandraxa.com/length_of_day.aspx

Length of Day

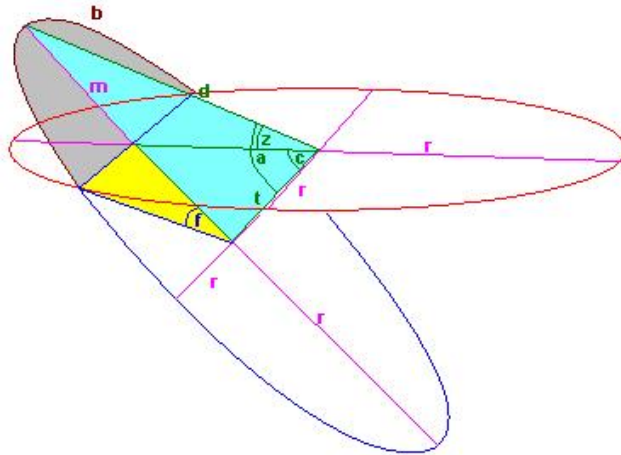


Fig. 1: Solar Circle for the Summer Solstice at 45° North

Angle between observer and sun's zenith

$$z = 90 - Lat - \cos \left(\pi * \frac{Day}{182.625} \right) \times Axis$$

Latitude of observer

$$c = -Lat$$

Angle between solar disc and sun's zenith

$$a = z - c$$

Distance from observer to sun's zenith

$$d = \frac{1}{\sin(a)}$$

Distance from observer to the center of the sun's circle

$$t = \cos(a)d$$

Exposed radius part between sun's zenith and sun's circle

$$m = 1 + \tan(c)t$$

Adjust range:

if m is negative, then the sun never appears the whole day long (polar winter): m must be adjusted to 0 (the sun can not shine less than 0 hours).

if m is larger than 2, the “sun circle” does not intersect with the planet's surface and the sun is shining the whole day (polar summer): m must be adjusted to 2 (the sun can not shine for more than 24 hours).

Angle between center of sun's disc and sunrise or sunset point on the solar circle (not the planet's disc), resp.

$$f = \arccos(1 - m)$$

Exposed fraction of the sun's circle (0=never...1 = whole day)

$$b = \frac{f}{180}$$

To get the number of hours the sun shines at the given Day at the given Latitude Lat, b needs to be multiplied by 24

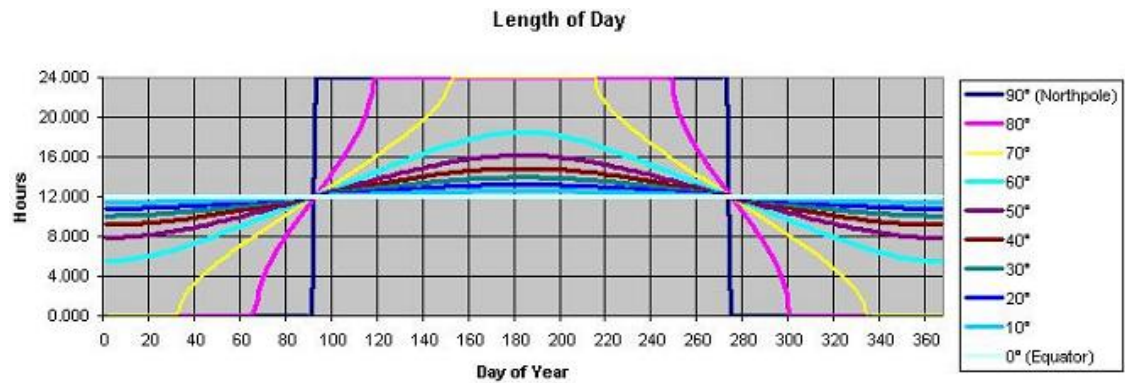


Fig. 2: Length of Day graphs for the Northern hemisphere. Note, that the x Axis starts out with the Winter Solstice and is not identical with the calendary start. (Thanks to Martin Bonda for reminding me to make this clear.)